Zamin Azmoon Group

پترولوژی

آمادگی آزمون کارشناس‌ارشد و دکتری زمین‌شناسی

دکتر رامین صمدی

گروه آموزشی و پژوهشی زمین آزمون

Dr. Ramin Samadi

www.zaminazmoon.com

بسم الله الرحمن الرحیم

ZaminAzmoon Group

جزوات وقف عام گروه زمین آزمون

غیر قابل فروش



پترولوژی

جزوات آمادگی آزمون کارشناسی‌ارشد و دکتری زمین‌شناسی

تألیف: دکتر رامین صمدی

بسمه تعالی

پیامبر خدا (صلی الله علیه و آله و سلم) فرمودند:

هرگاه مؤمن یک برگه که روی آن علمی نوشته شده باشد از خود برجای گذارد، روز قیامت آن برگه پرده میان او و آتش می شود و خداوند تبارک و تعالی به ازای هر حرفی که روی آن نوشته شده، شهری هفت برابر پهناورتر از دنیا به او می دهد.

سلام علیکم؛

ایزد دانا را سپاس می گوییم که ما را یاری بخشید تا بتوانیم در زمینه تحقق آرمان های علمی و میهنی خویش، گامی دیگر برداریم. «زمین آزمون» با هدف ایجاد بانک اطلاعاتی جزوات آمادگی آزمون کارشناسی ارشد و دکتری زمین شناسی و نیز کمک به دانشجویان و محققین این رشته در سال ۱۳۸۶ آغاز به فعالیت نمود. در این راه استادان و دانشجویان و پژوهشگران محترمی با هم فکری خود به ما یاری رسانده اند که اگر این هم فکری و کمک ها نبود شاید این مهم ناتمام می ماند.

اکنون به پاس ۱۰ سال تلاش صادقانه گروه آموزشی و پژوهشی زمین آزمون، هزاران امید و تلاش به ثمر نشسته است و فرهیختگان بسیاری همراه ما با موفقیت در دوره های کارشناسی ارشد و دکتری زمین شناسی تحصیل نموده اند. برای پاسداشت علم و ترویج علم مقدس زمین شناسی، گروه زمین آزمون کلیه جزوات آمادگی آزمون کارشناسی ارشد و دکتری زمین شناسی خود را به صورت وقف عام به همه فرهیختگان جامعه علمی زمین شناسی ایران تقدیم می نماید. شایسته است از زحمات آقای مهندس مجتبی رجبی، خانم دکتر نرگس شیردشت زاده، خانم مهندس بیترا محمودزاده، آقای مهندس رسول صادقی و دیگر بزرگواران تقدیر گردد. بی گمان این مجموعه از کاستی ها و نواقص احتمالی مبری نیست ولی می تواند مسیری روشن را پیرامون داوطلبان محترم و پژوهشگران گرامی بگشاید. پیروزی و موفقیت شما را در تمامی آزمون های زندگی آرزومندیم.

مدیر گروه مؤلفین زمین آزمون

دکتر رامین صمدی

پترولوژی (PETROLOGY)

- **پترولوژی**: علم شناخت سنگ است که شامل دو بخش است:

  پتروگرافی: سنگ‌شناسی توصیفی شامل خصوصیات ظاهری مثل ساخت اندازه...

  پتروژنز: در مورد منشأ و طرز تشکیل سنگ بررسی می‌کند.

- **پترولوژی** شامل مطالعه تاریخ تشکیل هر سنگ، ازجمله شرایط تشکیل، منشأ و فرسایش و تخریب است. پترولوژی شامل پتروگرافی (علم توصیف و رده‌بندی سنگ‌ها یعنی سنگ‌شناسی) و پتروژنز (شرایط تشکیل سنگ‌ها و کانسنگ‌ها) است.

بعضی از محققین پترولوژی را به دو بخش دیگر تقسیم می‌کنند که عبارت‌اند از:

۱- **پتروگرافی** Petrography یا علم توصیف و رده‌بندی سنگ‌ها امروزه سنگ‌شناسی نوین نوعی تاریخ‌نگاری از حوادثی است که آثار آن در سنگ‌ها به‌جا مانده است به‌طور خلاصه پتروگرافی یا سنگ‌شناسی توصیفی بخشی از سنگ‌شناسی است که وظیفه آن توصیف Description، نام‌گذاری Nomination و طبقه‌بندی Classification سنگ‌هاست. بهترین راه جهت پتروگرافی سنگ‌ها، بررسی میکروسکوپی مقاطع نازک Microscopic examination Thin Section آن‌هاست.

۲- **پتروژنز** Petrogenesis یا سنگ‌شناسی ژنتیکی، مطالعه منشأ و تکامل سنگ‌ها است یا به‌عبارت‌دیگر در مورد شرایط تشکیل سنگ‌ها و کانسنگ بحث می‌شود و شامل موضوعاتی هم چون منشأ Origin و نحوه تشکیل Formation سنگ‌ها مدنظر است که در این راه، محدوده عملیات نسبت به سنگ‌شناسی توصیفی، گسترده خواهد بود و از ابزار پیشرفته‌تری استفاده خواهد شد.

شایان‌ذکر است لیتولوژی Lithology که متأسفانه آن‌هم به سنگ‌شناسی ترجمه‌شده است توصیف سنگ‌ها به‌خصوص در نمونه دستی Hand Sample و رخنمون Out crop آن‌ها موردنظر بوده و خصوصیاتی هم چون رنگ، ترکیب کانی‌ها، اندازه دانه‌ها و به‌طورکلی فابریک سنگ‌ها موردبررسی قرار می‌گیرد؛ که از این لحاظ مشخص می‌شود لیتولوژی با پتروگرافی ارتباط نزدیکی دارد ولی باید توجه داشت که لیتولوژی خصوصیات فیزیکی و ظاهری سنگ‌ها را در حد مایکروسکوپی موردمطالعه قرار می‌دهد درحالی‌که در پتروگرافی مطالعات کامل‌تر و دقیق‌تر خواهد بود. مسائلی هم چون نحوه ارتباط صحرایی سنگ‌ها و تماس آن‌ها با یکدیگر، چگونگی توزیع سنگ‌ها، شیب و امتداد لایه‌ها و شکستگی‌ها و سایر موارد مشابه در حیطه عملکرد لیتولوژی قرار دارد.

- تعریف سنگ (ROCK): جسم جامد، طبیعی، هتروژن که از اجتماع یک یا چند نوع کانی ایجاد شده است. سنگ‌ها سه دسته‌اند: رسوبی، آذرین، دگرگونی. اصلی‌ترین جزء تشکیل‌دهنده سنگ‌ها کانی است.

- کانی (MINERAL): جسم جامد، طبیعی (غیر آلی) هموژن، دارای خصوصیات فیزیکی مشخص و ترکیب شیمیایی معین که به دو دسته سیلیکاته و غیر سیلیکاته تقسیم می‌شوند.

- **پاراژنز** شامل مجموع‌های از کانی‌های با شرایط تشکیل مشابه از نظر شیمیایی و ترمودینامیکی است که باهم در تعادل می‌باشند.

- **ایزومورفیسم و پلی مورفیسم**:

☜ **پلی‌مورفیسم**: کانی‌هایی که فرمول شیمیایی یکسان ولی سیستم تبلورشان متفاوت است.

آلوتروپی یا پلی‌مورفیسم عبارت است از:

- **انانسیوتروپ**: ۲ کانی تحت شرایط فیزیکی متغیر (T,P) به هم تبدیل می‌شوند پس این فرآیند برگشت‌پذیر است، مانند گروه کوارتز.
- **مونوتروپ**: پلی مورف‌های غیر قابل برگشت، مانند: آراگونیت ← کلسیت

✓ **توجه**: در فرآیندهای برگشت‌پذیر $d_s = \frac{dq}{T}$ ، برگشت‌ناپذیر $d_s \rangle \frac{dq}{T}$

☜ **ایزومورفیسم**: سیستم تبلور یکسان ولی ترکیب شیمیایی متفاوت است، مانند: Plg, Gar, Px, Olv

- **محلول جامد** یا مخلوط جامد یا میکس کریستال:

☜ نوعی ایزومورفیسم که در آن عناصر با شرایط زیر جایگزین هم می‌شوند:

- اختلاف شعاع یونی آن‌ها از ۱۵٪ یا ۰/۱۵ بیشتر نباشد، مثلاً کلسیت (Ca) و اسمیت زونیت (Zn) به علت اختلاف شعاع یونی بالا به‌رغم ایزومورف بودن، نمی‌توانند محلول جامد تشکیل دهند.
- اختلاف بار الکتریکی بیشتر از (۱<) نباشد.

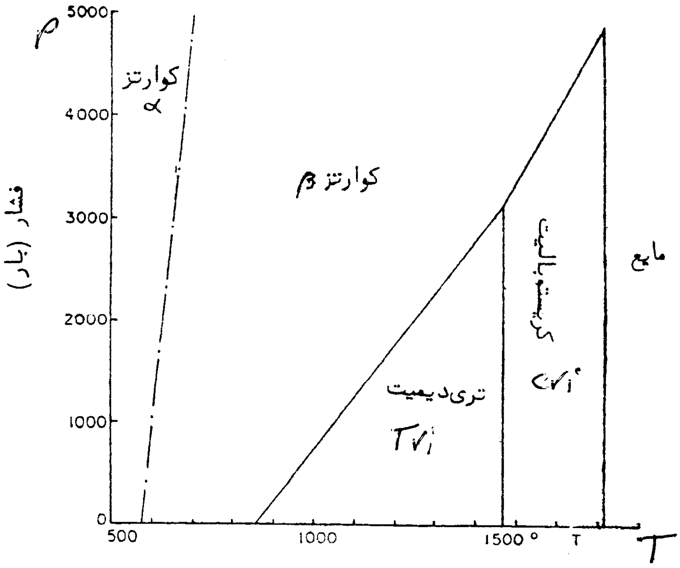
✓ **توجه**: برای تشکیل محلول جامد هر دو شرایط بالا الزامی است.

✓ **نکته**: در بعضی موارد به‌رغم ایزومورف نبودن محلول جامد تشکیل می‌گردد. به‌طور مثال اسفالریت (بلاند یا Zns) با سیستم Cubic و پیروتیت (پیریت مغناطیسی) با سیستم مونوکلین، ایزومورف نیستند ولی به علت داشتن شرایط بالا، محلول جامد می‌باشند.

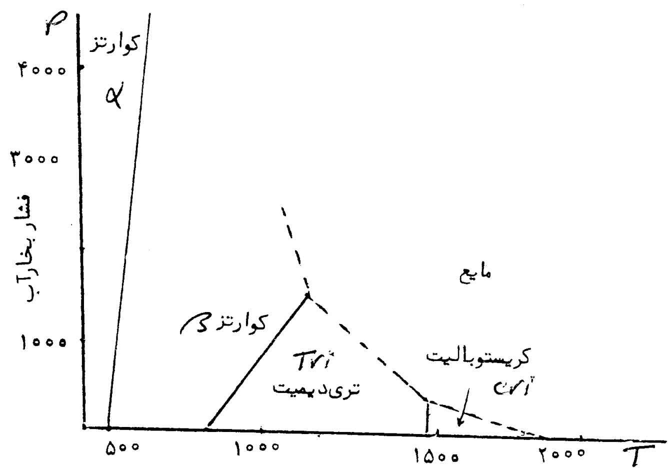
✓ **نکته**: محلول جامد حذف شده یا ناقص ← پیروتیت (فقدان آهن)

✓ **نکته**: محلول جامد در همه سیلیکات‌ها به‌غیراز خانواده سیلیس وجود دارد.

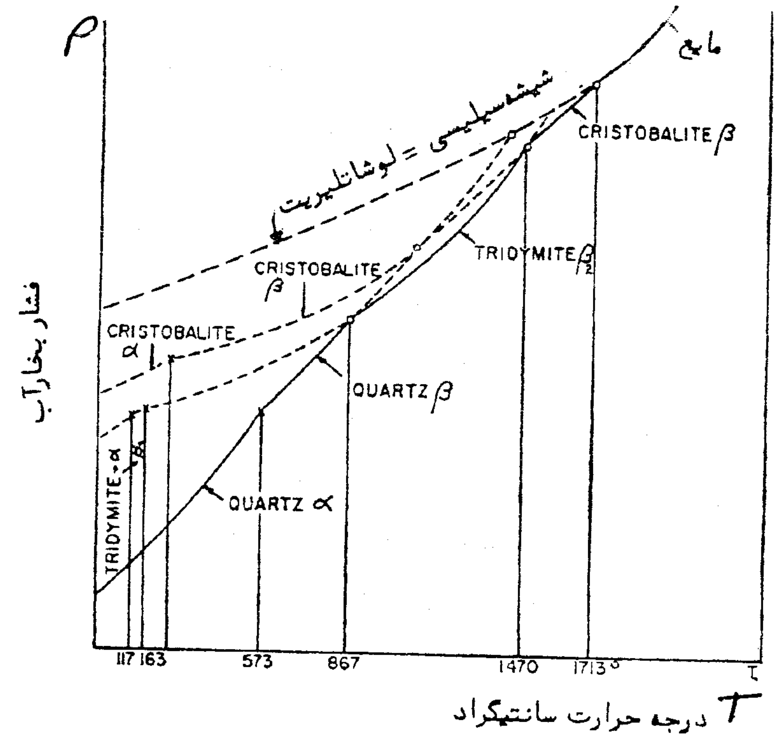
- **دیاگرام‌های پلی مورف‌های کوارتز:**
  - ✓ در سنگ‌های درونی ما اصلاً Tri (تریدیمیت) و Cri (کریستوبالیت) را نداریم.
  - ✓ Cri,Tri در سنگ‌های آذرین خروجی در حرارت بالا تشکیل می‌شوند.
  - ✓ بالاترین حرارت متعلق به کریستوبالیت است.
  - ✓ شرایط خشک و فشار معمولی: $\alpha \leftarrow \beta \leftarrow Tri \leftarrow cri \leftarrow$ مایع
  - ✓ شرایط خشک و فشار بالا: $\alpha \leftarrow \phi \leftarrow$ مایع
  - ✓ شرایط آبدار: $\alpha \leftarrow \beta \leftarrow Tri \leftarrow cri \leftarrow$ مایع
  - ✓ در شرایط خشک محدوده پایداری Cri, Tri بیشتر است.
  - ✓ در شرایط آبدار محدوده پایداری Cri, Tri کمتر است.



- ***دیاگرام پایداری انواع مختلف سیلیس Si در شرایط حرارت و فشار خشک***

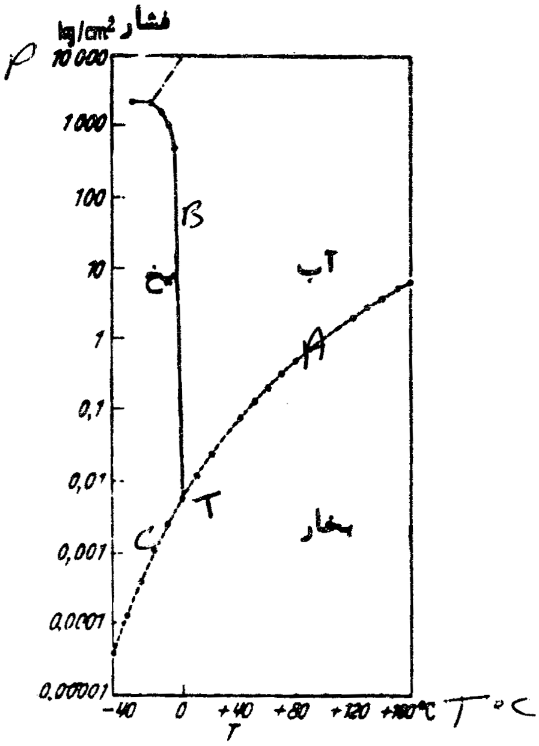


- ***دیاگرام پایداری انواع مختلف سیلیس حرارت و فشار آب***



شرایط تبدیل انواع مختلف SiO_2 (فنر، ۱۹۱۳)

- ✓ **دیاگرام انستاتیت:** نوعی Px که در سنگ‌های بازیک و فوق بازیک یافت می‌شود.
  - ✓ حرارت پایین ← کلینوانستاتیت
  - ✓ حرارت متوسط ← رومبوانستاتیت
  - ✓ حرارت بالا ← پرتوانستاتیت
  - ✓ این ۳ مورد قابل تبدیل به هم بوده و در کل منظور از انستاتیت در کتاب‌ها همان پروتوانستاتیت است.
  - ✓ **ذوب و کریستالیزاسیون (تبلور) کانی‌ها:**
- ▪ ذوب ناجور یا غیرعادی یا ناسازگار: ترکیب شیمیایی ماده ذوب شده با جامد اولیه متفاوت است، مثلاً:
  - ▪ انستاتیت (Px) ذوب متناقض ← Fo(Olv) جامد + Si مایع
  - ▪ ارتوکلاز (Or) ذوب متناقض ← Luc جامد + Si مایع
- ▪ ذوب جور یا عادی یا سازگار: ترکیب مایع با جامد اولیه یکسان است، مانند پلی مورف‌های کوارتز.



حالات مختلف آب برحسب تغییرات درجه حرارت و فشار

- **T یا نقطه تریپل:** وجود سه فاز آب با هم.
- منحنی جوش= **A**، منحنی ذوب= **B**، منحنی سوبلیماسیون= **C**
- همیشه با ازدیاد فشار خشک، درجه حرارت بالاتر می‌رود ولی در حضور فشار آب کاهش می‌یابد.
- **نکات:**
  - در سیستم بسته فقط تبادل انرژی داریم (دگرگونی دینامیکی)
  - به علت پایین بودن قابلیت هدایت حرارتی سنگ‌ها است که دما در عمق‌های زیاد بالا است.
  - فابریک شامل: بافت (تکستور) + ساخت (استروکتور)
- **سورفوزیون:** عدم تعادل و مذاب ماندن ماده تا درجات پایین‌تر از حد تبلور.
- **تبلور کانی در درجه حرارت بحرانی:**
  - تبلور بالاتر از آن: کانی به حالت گازی ته‌نشین می‌شود.
  - تبلور پایین‌تر از آن: کانی از حالت مایع به حالت جامد متبلور می‌شود.
- **فشار** شامل: هیدرواستاتیک Pf، لیتواستاتیک Ps
  - فشار هیدرواستاتیک در هر عمق معادل $\frac{1}{3}$فشار لیتواستاتیک است.
- **فوگاسیته اکسیژن:** فعل‌وانفعالات اکسیژن یا اکسیژن کافی در ماگما جهت فعل‌وانفعالات.

- ✓ **درجه پلی مریزاسیون**: یک کانی عبارت است از تعداد اکسیژن که یک تترائدر با تترائدر مجاور به اشتراک می‌گذارد و هر چه کمتر باشد، کانی در حرارت بالاتر تشکیل می‌شود (فورستریت = ۰ دیوپسید = ۲، لابرادوریت = ۴)
- ✓ **اسیدیته کانی‌ها:**

کانی	اسیدیته
کوارتز (SiO_2)	۱۰۰ درصد
ارتوز K [Si_3AlO_8]	۶۰ درصد
پیروکسن Mg_2 [$(SiO_3)_2$]	۵۰ درصد
لابرادور CaNa [$Si_5Al_3O_{16}$]	۵۰ درصد
آنورتیت Ca ($Si_2Al_2O_8$)	۴۰ درصد
الیوین Mg_2 [SiO_4]	۳۳/۳ درصد
نفلین Na [$SiAlO_4$]	۳۳/۳ درصد

٦٠<اسیدی، **٦٠-٥٠** خنثی، **٥٠**> بازی یا غیر اشباع

$$\text{اسیدیته کانی} = \frac{\text{کاتیون Si}}{\text{مابقی کاتیون‌ها + Si}}$$

- محیط خشک: Olv → Chl → Serp
- محیط آبدار: سرپانتین → Olv Serp
- ناشناخته‌های سری باون مرحله Amph → Px (به علت عدم تعیین فشار اکسیژن)
- ناشناخته‌های سری باون مرحله Amph → Bio (به علت عدم تعیین فشار اکسیژن)

- اگر حرارت زیاد باشد: لوسیت + Si ← سانیدین
- اگر حرارت کم باشد: لوسیت + مایع Na دار ← نفلین + ارتوز

- پیروکسن Px حرارت کمتر: Opx سری ایزومورف از انستاتیت تا ارتوفروسیلیت.
- حرارت بیشتر Px هدنبرژیت، اوژیت، دیوپسید

- امفاسیت محلول جامد بین دیوپسید و ژاده ایت است.

✗ **انواع واکنش‌ها:**

۱. از دست دادن آب رطوبت: $R_{H_2O} \rightarrow R + H_2O - \Delta E$
۲. از دست دادن آب ساختمانی: $R_{(OH)_2} \rightarrow R_O + H_2O - \Delta E$
۳. از دست دادن گاز کربنیک یا CO_2: $R_{CO_3} \rightarrow Ro + CO_2 - \Delta E$
۴. واکنش تبدیلی: $R_{SO_3} \rightarrow R_O + SO_2 - \Delta E$
۵. $R \rightarrow \overline{R} \overset{+}{\underset{-}{}} \Delta E$

- **قوانین ترمودینامیک:**
  - قانون اول: رابطه بین انرژی‌ها
  - قانون دوم: مفهوم جهت واکنش
  - قانون سوم: مفهوم آنتروپی

- تشکیل ژادئیت یا یشم (Px فشار بالا و دفنی):

۱- آلبیت ← ژاده ایت + SiO_2 $\Delta G \rangle ۰$ ناممکن

۲- نفلین + کوارتز ← ژاده ایت $\Delta G \langle 0$ ممکن

۳- نفلین + آلبیت ← ژاده ایت $\Delta G \langle ۰$ ممکن

- تبدیل تریدیمیت به کریستوبالیت: وابسته به حرارت، α یا β: وابسته به فشار.
- در سنگ‌هایی که سریعاً سرد شده‌اند به‌جای α کوارتز، تریدیمیت و کریستوبالیت داریم.

- توجه: مقدار کاهش حرارت = رابطه عکس با فشار (P) $\dfrac{\text{مقدار ناخالصی}}{\text{درجه حرارت ذوب}}$

- تعیین کانی‌های حاصل از ذوب یک کانی برحسب درصد:

$$\text{درصد کانی به‌دست‌آمده از ذوب} = \dfrac{\text{جرم مولکولی کانی به‌دست‌آمده از ذوب}}{\text{جرم ملکولی کانی ذوب شده}}$$

- **قانون فازها یا گیبس:**

$$\Delta G \text{ محصولات} - \Delta G \text{ مواد اولیه} = \Delta G$$

اگر ۰ = ΔG: واکنش در تعادل است.

اگر ۰ < ΔG: واکنش از راست (ناپایدار) به چپ (پایدار)

اگر ۰> ΔG: واکنش از چپ (ناپایدار) به راست (پایدار)

- تعیین تعداد سازنده‌ها در واکنش‌های شیمیایی:

تعداد سازنده‌ها = تعداد ترکیبات – تعداد واکنش‌ها.

- محاسبه تعداد کانی‌ها:
  - ✓ R: واکنش مستقل بین فازها $\varphi = N + ۲ - (R + V)$
  - ✓ N: تعداد تشکیل‌دهنده.
  - ✓ ۹۹٪ ماگماها از ۷ کانی و ۸ عنصر تشکیل‌شده‌اند که دارای ۷ فاز هستند.
  - ✓ C (تعداد تشکیل‌دهنده): تعداد واکنش – تعداد ترکیب
  - ✓ اصل لوشاتلیه: با افزایش فشار سیستم به سمتی می‌رود که حجم کاهش یابد.

- **سیستم (SYSTEM):** قسمتی از جهان است که به‌منظور مطالعات خاص انتخاب می‌شود و می‌تواند در حد میکروسکپی (thin section) و یا ماکروسکپی (magma chamber) باشد. سیستم و محیط همیشه باهم‌اند (محیط چیزی است که پیرامون سیستم است)
- **انواع سیستم‌ها (بر اساس تبادل ماده و انرژی):**
  - **منفرد** یا مستقل (عالم یا جهان) یا عایق و ایزوله (با محیط تبادل ماده و انرژی نمی‌کند مثل سیستم‌های سن سنجی)
  - **بسته** (فقط تبادل انرژی): (مثل خورشید و زمین) (مثل تبدیل بازالت یا گابرو ← اکلوژیت)
  - باز: با محیط تبادل ماده و انرژی می‌کند یک توده نفوذی گرانیت در مارن و تبدیل آن به اسکارن
  - آدیا باتیک یا بی دروُ روُ: با محیط تبادل ماده و انرژی نمی‌کند ولی کار انجام می‌دهد مثل دیاپیرهای گوشته (ماگمای گوشته)، دیاپیرهای نمکی (گنبدهای نمکی)

- **فاز (PHASE):** هر جزء سیستم که از نظر فیزیکی مشخص و از نظر مکانیکی قابل جدا کردن از سایر قسمت‌ها باشد را یک فاز است (تجزیه شیمیایی نباید روی آن اثر داشته باشد) مثل اتمسفر که از گازهای مختلف تشکیل شده ولی فقط یک فاز گازی است.
  - هر ماده جامد یک فاز، فازهای مایع اگر محلول باشند یک فاز ولی مخلوط باشند، هرکدام یک فاز می‌باشند.

- **سازنده شیمیایی یا جزء: (component):**
  - حداقل سازنده‌هایی که بتوان تمام فازهای سیستم را با آن تعریف بیان کرد. مثال:
    - سیستمی که شامل آب، یخ و بخار است شامل سه فاز ولی یک جزء دارد (H_2O)
    - پلاژیوکلاز محلول جامدی از آلبیت ($NaAlSi_3O_8$) و آنورتیت ($CaAlSi_3O_8$) است که کامپوننت آن‌ها آلبیت و آنورتیت است.
    - الیوین که محلول جامدی از فایالیت (Fe_2SiO_4) و فورستریت (Mg_2SiO_4) است.

- **تعادل (پایداری) در سیستم:**
  - ۱) پایدار (Stable): حداقل تبادل انرژی را با محیط اطراف و تمایل به تغییر ندارد
  - ۲) نیمه پایدار (Metastable): انرژی پتانسیل آن بالاست و باید شرایط آماده شود تا به موقعیت پایدار برسد.
  - ۳) ناپایدار (Unstable): انرژی پتانسیل آن حداکثر است و هر لحظه امکان تغییر و رسیدن به حالت پایدار وجود دارد.

مثلاً پلی‌مورف‌های کوارتز:

Q_β	Tri	Q_α
ناپایدار	نیمه پایدار	پایدار

→ ازدیاد حرارت →

قوانین ترمودینامیک:

- **قانون صفرم:** بیان می‌کند که اگر دو پیکره (جسم) با پیکره سومی در حال تعادل حرارتی باشند خود آن دو پیکره هم با یکدیگر در تعادل هستند.

$$A = C \ \& \ B = C \rightarrow A = B$$

- **اصل بقای انرژی (قانون اول ترمودینامیک):** انرژی نه به وجود می‌آید و نه از بین می‌رود بلکه از حالتی به حالت دیگر تبدیل می‌شود.

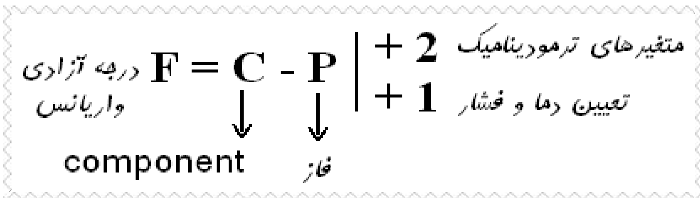
- **قانون دوم ترمودینامیک** (آنتروپی یا بی‌نظمی سیستم S): که نشان‌دهنده جهت واکنش‌ها است.

- **قانون سوم ترمودینامیک (آنتالپی H):** بیان می‌کند که آنتروپی یک ماده خالص و بلورین در دمای صفر مطلق صفر است.

- **آنتالپی:** مقدار حرارتی که در فشار ثابت از محیط گرفته یا به محیط داده می‌شود.
  گرمازا (اگزوترمیک) H −
  گرماگیر (اندوترمیک) H +

- **فاز دیاگرام:** نمایش هندسی محیط‌های پایداری فازها در شرایط مختلف فشار، دما و ترکیب شیمیایی که نتیجه کارهای تجربی و محاسبات ترمودینامیک است.

- **قانون فازها (قانون گیبس):** توسط ویلارد گیبس ارائه شد و به شرح زیر است:



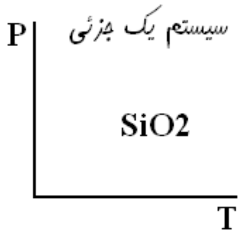
- **درجه آزادسازی F (واریانس):** بیان می‌کند که چه تعداد از متغیرها را می‌توان تغییر داد بدون آنکه تعادل از بین برود.

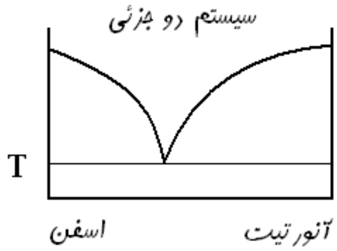
  - F = 0: به ازای تغییر هر متغیر، تعادل به هم می‌خورد پس F = 0 نقطه‌ای است که هیچ متغیری رانمی توان تغییر داد (نقطه نامتغیر Invariant Point).
    اگر بخواهیم حداکثر فازهای یک سیستم دیده شود باید درجه آزادی آن F = 0 باشد.

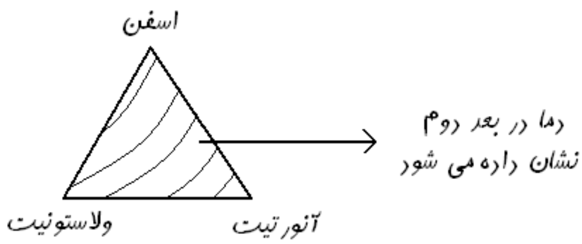
  - F = 1: خطوط یا منحنی تک متغیره Uninvariant cruve.
    سیستم‌های تکی F = C – P + 2 (یک جزء دارد)

- F = 2: (میدان یا صفحه دومتغیره). سیستم‌های دوتایی و یا بیشتر F = C – P + 1 (دو یا بیشتر جزء دارد)

- سیستم‌های کندانسه: سیستم‌هایی هستندکه فشار (P) آن‌ها ثابت و دما متغیر است و F = C – P + 1 برای کندانسه استفاده می‌شود. در سیستم‌های دوتایی و بیشتر فشار همیشه ثابت و دما تغییر می‌کند.







V = واریانس (درجه آزادی)

P = تعداد فازها

C = تعداد سازنده

قانون فازها: $V+P=C+2$

✘ نگاهی به قانون فازها در انواع سیستم‌ها:

۱- سیستم یک تشکیل‌دهنده: V+P= C+2

۲- سیستم دو تشکیل‌دهنده: V+P= C+1

۳- سیستم سه تشکیل‌دهنده: V+P = C+1

۴- سیستم چهار تشکیل‌دهنده: شامل ۶ سیستم دوتایی و ۴ سیستم سه‌تایی.

✘ قانون فازها برای سیستم‌های کندانسه:

سیستمی که فشار بخار آب در آن مورد توجه نباشد که با نادیده گرفتن فشار بخار آب (V=1) می‌شود؛ لذا از عدد ۲ در فرمول اصلی $V+P=C+2$ یک عدد کاسته می‌شود و به‌صورت زیر درمی‌آید:

(به‌جای $F \leftarrow V$)

$F+P=C+1$ یا $(F=C-P+1)$

سؤالات:

در یک سیستم تک جزئی حداکثر چند فاز می‌تواند تشکیل شود که در تعادل باشند؟

$$F = C - P + 2$$
$$0 = 1 - P + 2 \rightarrow P = 3$$

و به همین ترتیب در خط تک متغیره در سیستم تکی ۲ فاز و در میدان دومتغیره در سیستم تکی ۱ فاز با هم در تعادل هستند.

در یک سیستم دوتایی در نقطه نامتغیر حداکثر چند فاز است که با هم درتعادلند؟

$$F = C - P + 1$$
$$0 = 2 - P + 1 \rightarrow P = 3$$

در سیستم دوتایی در خطوط تک متغیره حداکثر فاز چند تا است که با هم در تعادل هستند؟

$$F = C - P + 1$$
$$1 = 2 - P + 1 \rightarrow P = 2$$

در سیستم دوتایی در میدان‌های دومتغیره حداکثر فاز چند تا است که در تعادل است؟

$$F = C - P + 1$$
$$2 = 2 - P + 1 \rightarrow P = 1$$

در سیستم دوتایی آنورتیت ـ اسفن درجه آزادی را در رأس اسفن یا آنورتیت محاسبه کنید؟

$$F = C - P + 1$$
$$F = 1 - 1 + 1 \rightarrow F = 1$$

در یک سیستم سه‌تایی حداکثر چند فاز با هم در تعادل هستند؟

$$F = C - P + 1$$
$$0 = 3 - P + 1 \rightarrow P = 4$$

سه جامد و یک مایع در سیستم تک متغیره؟

$$F = C - P + 1$$
$$1 = 3 - P + 1 \rightarrow P = 3$$

دو جامد و یک مایع در میدان‌های دومتغیره؟

$$F = C - P + 1$$
$$2 = 3 - P + 1 \rightarrow P = 2$$

در یک سیستم سه‌تایی در رأس‌ها درجه آزادی چقدر است؟

$$F = C - P + 1$$
$$F = 1 - 1 + 1 \rightarrow F = 1$$

مطالعه انواع سیستم‌ها:

سیستم‌های یک تشکیل‌دهنده (C =1):

- فقط از یک ماده یا تشکیل‌دهنده درست شده اند، مانند پلی مورف‌های کوارتز
- با افزایش تعداد فازها درجه آزادی کاهش می‌یابد. $P\downarrow \sim V\uparrow$
- در سیستم‌های یک تشکیل‌دهنده اگر نقطه مورد نظر در یک محدوده باشد درجه آزادی حداکثر است یعنی V=2 (T, P هر دو متغیرند) اگر روی یک منحنی باشد یعنی V=1 (T یا P می‌تواند تغییر کند) و اگر نقطه سه‌گانه باشد درجه آزادی کمترین است یعنی V=0 (یعنی T و P هیچ‌کدام تغییر نمی‌کند و هرکدام تغییر کند تعادل سیستم به هم می‌خورد)
- نکته: درجه آزادی عبارت است از: T = عامل حرارت، P = عامل فشار، X = ترکیب شیمیایی
- سیستم‌های تکی مهم شامل:
  - سیستم SiO_2
  - سیستم پتاسیم فلدسپات ($KAlSi_3O_8$)
  - سیستم سدیم فلدسپات ($NaAlSi_3O_8$)
  - سیستم آنورتیت ($CaAl_2Si_2O_8$)
  - سیستم انستاتیت ($MgSiO_3$)
- در ادامه به بررسی هر کدام پرداخته می‌شود:

سیستم SiO_2:

- پلی مورف‌های حرارتی SiO_2 عبارت هستند از:

  کوارتز α، کوارتز β، تریدیمیت، کریستوبالیت
- پلی مورف‌های فشاری SiO_2 عبارت هستند از:

  کوارتز α، کوزیت، استیشوویت

روند ذوب و تبلور:

- در فشار یک اتمسفر و دمای پایین کوارتز α داریم. سیستم تبلور کوارتز α تریگونال است و در سنگ‌های آذرین درونی دیده می‌شود. این پایدارترین نوع کوارتز است.
- در فشار یک اتمسفر حرارت کوارتز α را زیاد می‌کنیم. این پلی مورف در دمای 573°C به کوارتز β تبدیل می‌شود. سیستم تبلور این پلی مورف هگزاگونال است. این تغییر ساختار را displace یا جابجایی گویند.
- کوارتز β را در سنگ‌های آذرین درونی می‌توانیم مشاهده کنیم. وقتی حرارت به حد ۸۶۷°C می‌رسد این ترکیب به تریدیمیت تبدیل می‌شود.

- سیستم تبلور تریدیمیت ارتورومبیک است. این تغییر ساختار را ساختار مجدد می‌گویند (reconstructive). تریدیمیت مخصوص سنگ‌های آتش‌فشانی است که سریع سرد شده اند.
- دما را بیشتر می‌کنیم و به 1470°C می‌رسد. تریدیمیت به کریستوبالیت تبدیل می‌شود (سیستم کوبیک) که مخصوص سنگ‌های آتش‌فشانی است.
- وقتی دما به 1710°C برسد کریستوبالیت ذوب شده و مذابی غنی از سیلیس خواهیم داشت.
- به هنگام تبلور این مذاب همین روند به‌صورت برعکس انجام می‌شود.

بررسی روند فشاری

- اگر فشار را افزایش دهیم در حد 4 kb از سرد شدن مذاب مستقیماً کوارتز β تشکیل می‌شود
- اگر فشار به 19 kb برسد کوارتز α به کوزیت تبدیل می‌شود. کوزیت با سیستم منوکلینیک در سنگ‌های آتش‌فشانی اسیدی با انفجارهای شدید (پیروکلاست) و در محل برخورد شهاب‌سنگ‌ها دیده می‌شود.
- در فشار 100 kb کوزیت تبدیل به استیشویت می‌شود (سیستم تتراگونال) که فقط در محل برخورد شهاب‌سنگ‌ها دیده می‌شود.

✓ بنابراین از پلی مورف‌های کوارتز می‌توان به‌عنوان ترمومتر (دماسنج) و بارومتر (بارومتر) استفاده نمود.

سیستم پتاسیم فلدسپات: ($KAlSi_3O_8$)

- پتاسیم فلدسپات‌ها در سنگ‌های اسیدی و حد واسط دیده می‌شوند و دارای پلی مورف‌های مختلفی هستند که به ترتیب از دما پایین به بالا عبارت‌اند از:

  آدولاریا، میکروکلین، ارتوکلاز (ارتوز)، سانیدین

- **آدولاریا**: پلی مورفی است که در محلولهای گرمابی تشکیل می‌شود.
- **میکروکلین**: در سیستم تری کلینیک متبلور می‌شود. تترائدرها یا چهار وجهی‌ها در این پلی مورف از نظم خیلی خوبی برخوردارند. در سنگ‌های اسیدی درونی که دارای آب هستند دیده می‌شود (ماگمای آبدار).
- **ارتوکلاز**: در سیستم منوکلینیک متبلور می‌شود و چهار وجهی‌های آن نسبتاً منظم هستند. در سنگ‌های اسیدی تا حد واسط درونی دیده می‌شوند.

- **سانیدین**: پلی مورفی دما بالا است (بیشترین دما) سیستم منوکلینیک و ترائدرها نامنظم هستند. در سنگ‌های آتش‌فشانی اسیدی دیده می‌شوند. نتیجه اینکه چون فرصت کافی برای سرد شدن نداشته (سریع سرد شده) تترائدرها نامنظم هستند.

- **بررسی روند ذوب:**
  - از حرارت دادن میکروکلین در فشار یک اتمسفر ارتوز تشکیل می‌شود.
  - از حرارت دادن ارتوز در فشار یک اتمسفر سانیدین تشکیل می‌شود.
  - از حرارت دادن سانیدین در فشار یک اتمسفر و دمای ۱۱۵۰°C لوسیت و مذاب تشکیل می‌شود. چون پتاسیم فلدسپات در این دما به مایع خودش ذوب نمی‌شود، ذوب آن را ناسازگار یا غیرعادی می‌گویند (melting incongruent).
  - بعد از دمای ۱۵۳۰°C لوسیت هم ذوب می‌شود و یک مذاب کامل خواهیم داشت.
  - محدوده ذوب ناسازگار پتاسیم فلدسپات دمای 1150°C تا 1530°C و فشار یک اتمسفر است.
  - از خاصیت ذوب غیرعادی پتاسیم فلدسپات در صنایع سرامیک‌سازی استفاده می‌شود. (شکل‌پذیری در حالت خمیری)
  - حذف لوسیت از مایع مذاب باعث غنی شدن این مذاب از سیلیس می‌شود.

- **بررسی روند فشاری:**
  - در فشار 19 kb پتاسیم فلدسپات ذوب عادی می‌شود.
  - در هنگام تبلور در دمای 1530°C و فشار یک اتمسفر ابتدا لوسیت متبلور می‌شود.
  - به‌تدریج در دمای 1150°C لوسیت با مذاب واکنش داده و پتاسیم فلدسپات از نوع سانیدین متبلور می‌شود.
  - با کم شدن دما ارتوز و بعد میکروکلین متبلور می‌شوند.

- **سیستم آنورتیت ($CaAl_2Si_2O_8$):**
  - آنورتیت با درصدهای مختلف آلبیت انواع پلاژیوکلازها را به وجود می‌آورد.
  - آنورتیت در فشار یک اتمسفر و دمای 1553°C ذوب می‌شود.

- **بررسی روند ذوب و تبلور:**
  - محدوده ذوب غیرعادی آنورتیت فشار بیش از 9 kb دمای 1553°C می‌باشد که تولید کرندوم + مذاب می‌کند.
  - آنورتیت در فشار 20 kb به گارنت گروسولار + کیانیت + کوارتز تبدیل می‌شود. این پدیده را در گوشته هم می‌بینیم (ترکیب سنگ گوشته اولترابازیک از نوع پریدوتیت است).

- تا فشار 20 kb پلاژیوکلاز پریدوتیت داریم ولی در اعماق بیشتر (فشار بیشتر) گارنت گروسولار + کیانیت + کوارتز خواهیم داشت. در فشارهای بیشتر از 30 kb و دمای نزدیک به ذوب کوارتز و پیروکسن خواهیم داشت (رخساره گرانولیت).

- **سیستم آلبیت: ($NaAlSi_3O_8$).**
  - آلبیت دو پلی مورف دارد:

    آلبیت دما پایین (Low Albite) با سیستم تری کلینیک

    آلبیت دما بالا (High Albite) با سیستم منوکلینیک (منو آلبیت)
  - نوع اول را در سنگ‌های آذرین درونی و نوع دوم را در سنگ‌های آذرین خروجی یا آتش‌فشانی می‌بینیم.
- **بررسی روند ذوب و تبلور:**
  - اگر در فشار یک اتمسفر آلبیت را حرارت دهیم آلبیت دما پایین به آلبیت دما بالا تبدیل می‌شود.
  - در دمای 1120°C و فشار یک اتمسفر آلبیت دما بالا دچار ذوب غیرعادی می‌شود از آلبیت به‌عنوان ماده کمک ذوب در صنایع سرامیک‌سازی استفاده می‌شود.
  - در حرارت کمتر از ذوب و فشار 9 kb آلبیت به ژادئیت و کوارتز تبدیل می‌شود. در فشار حدود 19 kb ژادئیت پایدار است ولی کوارتز به کوزیت تبدیل می‌شود.
  - محدوده ذوب غیرعادی آلبیت در فشار حدود 30 kb و دمای 1120°C است که به ژادئیت و مایع تبدیل می‌شود.
- **سیستم انستاتیت: ($MgSiO3$)**
  - یک نوع ارتوپیروکسن است که ۳ پلی مورف دارد:

    انستاتیت دما پایین (کلینو انستاتیت)

    انستاتیت دما متوسط (رمبو انستاتیت)

    انستاتیت دما بالا (پروتو انستاتیت)

- **بررسی روند ذوب و تبلور:**
  - در فشار یک اتمسفر اگر انستاتیت را حرارت دهیم به‌تدریج کلینو انستاتیت به رمبوانستاتیت و رمبو انستاتیت به پروتوانستاتیت تبدیل می‌شود.
  - محدوده ذوب غیرعادی یا ناسازگار انستاتیت در دمای 1560°C است که پروتوانستاتیت به فورسریت + مایع تبدیل می‌شود.
  - اگر از این مذاب فورستریت را حذف کنیم مایعی غنی از سیلیس خواهیم داشت.
  - در فشار بیشتر از 5.5 kb و دمای ذوب، رمبو انستاتیت مستقیماً به مذاب تبدیل می‌شود (ذوب سازگار). در این دما و فشار پروتو انستاتیت پایدار نیست.

سیستم‌های دوتایی ساده (C=2):

(سیستم‌های دوتایی شامل دو سازنده یا دو تشکیل‌دهنده)

$$V + P = C + ۱$$
$$F = C - P + 1 \rightarrow F = 0 \rightarrow 0 = 2 - P + 1 \rightarrow P = 3$$

- در این سیستم‌ها حداکثر فاز P = 3 است که شامل ۲ فاز جامد و ۱ فاز مایع می‌شود.
- منحنی مایع: لیکیدوس
- منحنی جامد: سالیدوس
- E: نقطه اتکتیک یا یوتکتیک، معرف شروع ذوب و آخر تبلور است. در این نقطه فازهای جامد و مایع در تعادل‌اند.
- شروع ذوب در E و آخر تبلور هم در E است.
- انواع سیستم‌های ۲ تائی:
  - سیستم دو تائی ساده
  - سیستم دو تائی پریتکتیک (واکنشی)
  - سیستم دو تائی با انحلال جامد کامل
  - سیستم دو تائی با انحلال جامد محلول
  - سیستم دو تائی با انحلال جامد و نقطه یوتکتیک

در ادامه به بررسی هر یک از انواع سیستم‌های دوتایی مذکور پرداخته می‌شود:

دیاگرام دوتایی ساده:

✓ موادی که از نظر شعاع یا بار یونی قابلیت جانشینی ندارند یا سیستم تبلور متفاوت داشته باشند این سیستم‌ها را تشکیل می‌دهند.

✓ یک سیستم دو تائی ساده قسمت‌های مختلفی دارد.

مثلاً سیستم دو تائی ساده اسفن ـ آنورتیت شامل چند قسمت است:

۱) منحنی لیکوئیدوس: این منحنی مرز بین فاز مایع و مایع ـ جامد است.

۲) منحنی سالیدوس: مرز بین فاز جامد و مایع ـ جامد است.

۳) نقطه یوتکتیک (I یا E): حداقل دمای ذوب و تبلور را در این سیستم دارد.

سیستم اسفن ـ آنورتیت:

✓ ترکیب A:

از نظر ترکیب ۸۰ درصد آنورتیت و ۲۰ درصد اسفن دارد. (از A به سمت پایین عمود می‌کنیم و درصدها را بررسی می‌کنیم)

برای بررسی تبلور از A بر لیکوئیدوس عمود می‌کنیم که لیکوئیدوس را در نقطه h قطع می‌کند و اولین جامد تشکیل می‌شود. (تبلور آنورتیت)

کاهش دما از h به سمت I باعث تبلور آنورتیت می‌شود. وقتی به نقطه (I) یوتکتیک رسید همزمان آنورتیت و اسفن با هم متبلور می‌شوند. در این نقطه دما ثابت می‌ماند تا تمام مایع به جامد تبدیل شود. سپس کاهش دما در این سیستم باعث تغییرات پلی مورفی می‌شود. یعنی فازهای حرارت بالا به فازهای حرارت پایین تبدیل می‌شود (حالت پایدار)

- ✓ ترکیب X:

محل برخورد X با لیکوئیدوس همان نقطه یوتکتیک است. یعنی حداقل دمای تبلور و همزمان اسفن و آنورتیت با هم تشکیل می‌شوند. پس در نقطه یوتکتیک، مایع همزمان تشکیل دو فاز اسفن و آنورتیت را با هم می‌دهد و در این نقطه دما ثابت می‌ماند تا تمام مایع به جامد تبدیل شود.

- ✓ ترکیب J:

از نظر ترکیب ۹۰ درصد اسفن و ۱۰ درصد آنورتیت دارد.

در نقطه K از مایع J اسفن متبلور می‌شود. (کاهش دما از اسفن به سمت I) پس در مسیر K تا I اسفن متبلور می‌شود تا برسد به نقطه I که در این نقطه همزمان اسفن و آنورتیت با هم متبلور می‌شود. در این نقطه دما ثابت می‌ماند تا تمام مایع به جامد تبدیل شود و سپس تغییرات پلی مورفی صورت می‌گیرد.

- ✓ بررسی روند ذوب:

جامد A با ۸۰ درصد آنورتیت و ۲۰ درصد اسفن را حرارت می‌دهیم تا دمای آن به نقطه یوتکتیک برسد. در این نقطه همزمان آنورتیت و اسفن ذوب می‌شوند و دما ثابت می‌ماند تا تمام اسفن ذوب شود. بعد از اینکه تمام اسفن ذوب شد، در مسیر I تا H (محل برخورد با لیکوئیدوس) باقی‌مانده آنورتیت ذوب می‌شود.

- ✓ «در سیستم دوتایی ساده در نقطه یوتکتیک جامدی که درصد کمتری دارد زودتر ذوب می‌شود».

- قانون اهرم‌ها:

یعنی می‌خواهیم در هر لحظه در مسیر I تا H در یک نقطه خاص درصد فاز جامد و مایع موجود در سیستم را بررسی کنیم.

حال طبق قانون اهرم‌ها مایع A در دمای D:

از نقطه D خطی برخط ترکیب و منحنی لیکوئیدوس رسم می‌کنیم. (محل برخورد نقطه C)

$$\text{درصد فاز مایع در نقطه D} = (BD \div CD) \times 100$$

✓ مایع J در دمای F:

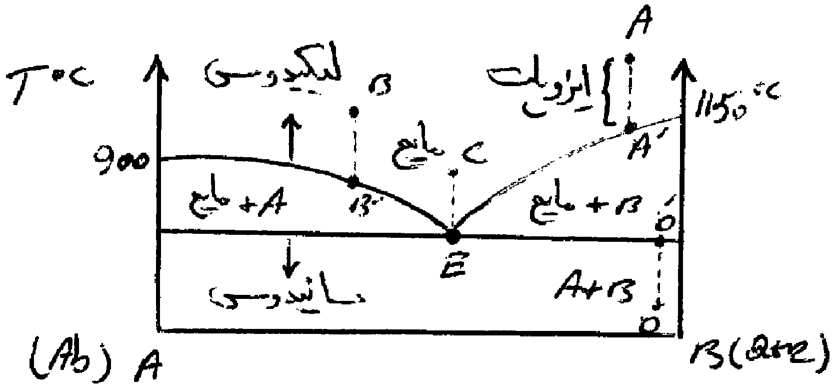
$$\text{درصد فاز جامد در نقطه F} = (EG \div FG) \times 100$$

$$\text{درصد فاز مایع در نقطه F} = (EF \div FG) \times 100$$

✓ نکته: هر چیزی که قبل از برخورد با لیکوئیدوس است مایع بوده و هر چیزی که بعد از برخورد با لیکوئیدوس است جامد است.

✓ منحنی اسفن ـ آنورتیت نقطه A:

در این شکل از نقطه مایع A تا قبل از برخورد با منحنی لیکوئیدوس خیلی سریع اتفاق می‌افتد (H). از نقطه H تا نقطه I (یوتکتیک) دما با سرعت کمتری کاهش می‌یابد. در نقطه یوتکتیک دما ثابت می‌ماند تا تمام مایع تبدیل به جامد شود. بعد از نقطه یوتکتیک دما کاهش می‌یابد و فقط تغییرات پلی مورفیک (ساختاری) اتفاق می‌افتد و چیزی تبلور نمی‌یابد.



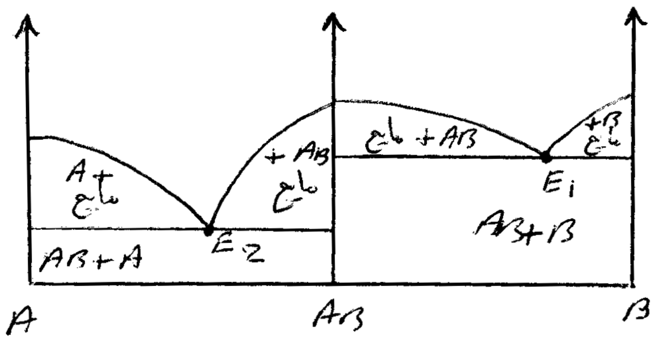
☜ **تبلور مایعA:** حاوی ۷۵٪ کوارتز و ۲۵٪ آلبیت است از نقطه A تبلور آغاز می‌گردد، تا قبل از منحنی لیکیدوس A' کاهش حرارت سریع، با رسیدن به A' اولین بلور Qtz متبلور شده، مابقی تبلور روی خط $A'E$ که فقط کوارتز متبلور می‌شود و مایع باقیمانده از آلبیت غنی می‌گردد تا اینکه در نقطه یوتکتیک همزمان با Qtz، Ab متبلور شده و عمل تبلور خاتمه می‌یابد.

☜ **تبلور مایع B:** از B تا B' کاهش حرارت سریع تا در نقطه B' اولین بلور Ab متبلور می‌شود، بقیه عمل تبلور در مسیر B' E است که فقط Ab متبلور می‌شود و مایع باقیمانده از کوارتز غنی می‌گردد و بالاخره در نقطه E همزمان با Ab، Q متبلور شده و عمل تبلور خاتمه می‌یابد.

☜ **تبلور مایع c:** تبلور از c آغاز و در فاصله CE کاهش حرارت سریع، تا اینکه در نقطه E، Ab و Qtz همزمان متبلور شده و عمل تبلور خاتمه می‌یابد.

☜ **ذوب جامد D:** ابتدا درصد ماده مذاب از Ab, Qtz را در نقطه E محاسبه می‌کنیم، با توجه به درصدهای داده شده چون Ab کمتر از Qtz است تمام Ab در نقطه D' ذوب می‌شود ولی فقط ۲۰٪ کوارتز ذوب می‌شود D' که از نظر حرارتی معادل نقطه E است. مابقی عمل ذوب روی EA' که در این مسیر ۵۵٪ کوارتز باقیمانده ذوب می‌شود تا در A' آخرین بلور ذوب شده و عمل ذوب خاتمه می‌یابد.

➢ دیاگرام دوتایی حد واسط بدون نقطه واکنش:



- ✓ در این دیاگرام سازنده‌های A, B با هم در یک سنگ اصلاً یافت نمی‌شوند.
- ✓ این دیاگرام در مورد ذوب و تبلور کانی‌هایی کاربرد دارد که دارای ذوب جور یا عادی باشند.
- ✓ نحوه تعریف فرآیندها مشابه دیاگرام‌های دوتایی ساده است، ولی نقطه یوتکتیک آن باید مشخص شود ($E1$ یا $E2$)
- ✓ این دیاگرام شامل ۲ دیاگرام ساده است.

➢ سیستم دوتایی ساده با یک ترکیب حد واسط:

در سمت چپ نمودار نفلین و در سمت راست سیلیس داریم. ترکیب حد واسط این دو آلبیت است ($NaAlSi_3O_8$) اگر SiO_2 بیشتر از ۵۵ درصد باشد تبلور در سیستم دوتایی ساده آلبیت ـ سیلیس اتفاق می‌افتد و اگر کمتر از ۵۵ درصد باشد، تبلور در سیستم آلبیت ـ نفلین اتفاق می‌افتد. پس این موضوع حل می‌شود که چرا کوارتز و نفلین در طبیعت با هم دیده نمی‌شوند. زیرا با هم واکنش می‌دهند و ترکیب حد واسطی بانام آلبیت تولید می‌کنند.

اگر سنگ ما غنی از SiO_2 باشد ترکیب آن آلبیت سیلیس است و اگر سنگ ما تحت اشباع (آلکالی یا فوق آلکالی) باشد ترکیب آن آلبیت ـ نفلین است.

➢ دیاگرام‌های دوتایی با نقطه واکنشی:

✓ این سیستم‌ها دارای یک ترکیب واکنشی‌اند، مثلاً:

سیستم لوسیت ـ سیلیس با ترکیب واکنشی پتاسیم فلدسپات

سیستم الیوین (از نوع فورستریت) ـ سیلیس با ترکیب واکنشی انستاتیت

✓ پس ترکیباتی که ذوب و تبلور ناسازگار دارند در این سیستم‌ها جای می‌گیرند.

✓ در این سیستم‌ها منحنی سالیدوس و لیکوئیدوس و نقطه یوتکتیک را داریم و یک نقطه به اسم C یا نقطه واکنشی هم داریم.

❖ سیستم دوتایی لوسیت ـ سیلیس با ترکیب واکنشی پتاسیم فلدسپات:

✓ این سیستم را به چند محدوده تقسیم می‌کنیم:

۱) محدوده اول ترکیباتی که بین محور لوسیت و پتاسیم فلدسپات قرار می‌گیرند.

در این محدوده دمای نهایی تبلور و شروع ذوب، نقطه واکنشی است (T_C)

برای بررسی روند تبلور ترکیب F از این نقطه بر لیکوئیدوس عمود می‌کنیم. ادامه این خط تا خط ترکیب پایین می‌آید. در نقطه F لوسیت متبلور می‌شود. در مسیر F تا C هم لوسیت متبلور می‌شود. در نقطه C (نقطه واکنشی) دما ثابت است و لوسیت با مایع واکنش می‌دهد و به پتاسیم فلدسپات می‌شود. میزان لوسیت باقی‌مانده در نقطه C بستگی به ترکیب اولیه سیستم دارد. هرچقدر ترکیب به محور لوسیت نزدیک‌تر باشد در پایان تبلور لوسیت بیشتری باقی می‌ماند و هر چه ترکیب به پتاسیم فلدسپات نزدیک‌تر باشد در پایان تبلور لوسیت کمتری باقی می‌ماند.

نقطه D: ترکیب D دقیقاً منطبق بر محور پتاسیم فلدسپات است پس در نقطه C تمام لوسیت به پتاسیم فلدسپات تبدیل می‌شود. جدا کردن لوسیت قبل از پایان تبلور، دما و ترکیب نهایی را تغییر می‌دهد.

بررسی روند ذوب در محدوده اول:

جامد F را در نظر می‌گیریم. شروع ذوب نقطه واکنشی است یعنی جامد F را آن‌قدر حرارت می‌دهیم تا دمایش به دمای نقطه C برسد. در شروع پتاسیم فلدسپات به‌صورت ناسازگار در نقطه C ذوب شده و تبدیل به لوسیت و مایع غنی از سیلیس می‌شود. دما در این نقطه ثابت می‌ماند تا تمام پتاسیم فلدسپات ذوب شود. در مسیر C تا F دما زیاد می‌شود و تمام لوسیت ذوب و ۱۰۰ درصد مایع می‌شود.

«از درصد ذوب بخشی کم جامد F ماگمای غنی از سیلیس به دست می‌آید»

۲) محدوده دوم ترکیبات بین محور پتاسیم فلدسپات و نقطه C:

هر ترکیبی که در این محدوده قرار گیرد دمای شروع ذوب و پایان تبلورش نقطه I یا (یوتکتیک) است.

نقطه H: مایع را سرد می‌کنیم تا در محل برخورد (R) لوسیت متبلور می‌شود. کاهش دما به سمت I است و قبل از آن به نقطه C می‌رسد در نقطه واکنشی (C) لوسیت با مایع واکنش می‌دهد و ۱۰۰ درصد به پتاسیم فلدسپات تبدیل می‌شود. در این نقطه دما ثابت مانده تا تمام لوسیت به پتاسیم فلدسپات تبدیل شود (به‌صورت ناسازگار). بعدازاین مرحله دما کم می‌شود تا I. از C تا I پتاسیم فلدسپات به‌صورت سازگار متبلور می‌شود. در نقطه I به‌طور همزمان پتاسیم فلدسپات و تریدیمیت متبلور می‌شود و دما ثابت می‌ماند تا تمام جامد به پتاسیم فلدسپات و تریدیمیت تبدیل شود (به طریق سازگار)

پس تبلور پتاسیم فلدسپات در سه محل انجام می‌شود:

۱) در نقطه C به‌صورت ناسازگار

۲) در مسیر C تا I به‌صورت سازگار

۳) در نقطه I که آن‌هم به‌صورت سازگار است.

بررسی روند ذوب در محدوده دوم:

نقطه شروع ذوب نقطه I است. ترکیب ما H است. ادامه می‌دهیم تا لیکوئیدوس را قطع کند و پایانش هم محل برخورد با لیکوئیدوس است (R).

در نقطه I همزمان پتاسیم فلدسپات و تریدیمیت شروع به ذوب می‌کنند و دما در این نقطه ثابت می‌ماند تا تمام تریدیمیت و مقداری از پتاسیم فلدسپات ذوب شود. بعد دما به سمت C افزایش می‌یابد. از I تا C پتاسیم فلدسپات به‌صورت سازگار ذوب می‌شود اما در نقطه C این ذوب ناسازگار و تبدیل به لوسیت و مایع غنی از سیلیس می‌شود. تا زمانی که تمام پتاسیم فلدسپات به لوسیت می‌شود دما ثابت می‌ماند. در ادامه در مسیر C تا R لوسیت ذوب می‌شود.

<u>۳) محدوده سوم ترکیبات بین نقطه C تا نقطه I:</u>

برای این ترکیبات نقطه شروع ذوب و پایان تبلور نقطه I است.

مایع Y: با کم شدن دما در نقطه Z پتاسیم فلدسپات متبلور می‌شود. تا نقطه I و در نقطه I همزمان تریدیمیت و پتاسیم فلدسپات تشکیل می‌شوند.

بررسی روند ذوب در محدوده سوم:

در نقطه I همزمان پتاسیم فلدسپات و تریدیمیت ذوب می‌شوند تا تمام تریدیمیت ذوب شود سپس حرکت می‌کند به سمت C تا تمام پتاسیم فلدسپات تماماً ذوب شود.

۴) محدوده چهارم ترکیبات بین نقطه I و محور SiO_2:

مایع W: از W عمود می‌کنیم تا لیکوئیدوس را در نقطه N قطع کند. در این نقطه کریستوبالیت (کوارتز حرارت بالا) تشکیل می‌شود. از N به سمت I کوارتز متبلور می‌شود (چون دما کم می‌شود) سپس ابتدا کریستوبالیت و بعد در دمای ۱۴۷۰ C^{o} کریستوبالیت تبدیل به تریدیمیت می‌شود. در نقطه I همزمان تریدیمیت و پتاسیم فلدسپات متبلور می‌شوند.

بررسی روند ذوب در محدوده چهارم:

جامدی با ترکیب W نقطه شروع تبلورش I است. عمود می‌کنیم تا لیکوئیدوس را در نقطه N قطع کند. در نقطه I همزمان تریدیمیت و پتاسیم فلدسپات ذوب می‌شوند که پتاسیم فلدسپات کاملاً ذوب می‌شود و دما ثابت می‌ماند تا تمام پتاسیم فلدسپات و مقداری تریدیمیت ذوب شود. در مسیر I تا J تریدیمیت ذوب شده و در J و در دمای 1470°C ابتدا تریدیمیت باقی‌مانده به کریستوبالیت تبدیل می‌شود سپس کریستوبالیت باقی‌مانده از J تا N ذوب می‌شود.

❖ سیستم دوتایی Mg_2SiO_4 و SiO_2 با ترکیب واکنشی انستاتیت:

این سیستم به دو سیستم دوتایی ساده تبدیل می‌شود:

۱) محدوده اول که شامل یک سیستم دوتایی ساده بین پریکلاز (MgO) و فورستریت (Mg_2SiO_4)

۲) و محدوده دوم شامل یک سیستم دوتایی با ترکیب واکنشی بین فورستریت و SiO2 که ترکیب حد واسط انستاتیت ($MgSiO_3$) است.

اگر مقدار SiO_2 کمتر از ۴۲ درصد باشد ترکیب در سیستم دوتایی ساده پریکلاز ـ فورستریت قرار می‌گیرد.

در اسکارن‌های منیزیم دار می‌توان پریکلاز و فورستریت را با هم مشاهده کرد.

به علت اینکه پریکلاز دمای ذوب بالایی دارد از آن در صنایع دیرگداز و نسوز استفاده می‌شود و چون در طبیعت به‌صورت کانسار اصلی زیاد یافت نمی‌شود به شکل فرعی از منیزیت $MgCO_3$ که مهم‌ترین منبع آن است به دست می‌آید.

ترکیباتی که SiO_2 بیشتر از ۴۲ درصد داشته باشند در محدوده سیستم دوتایی با ترکیب واکنشی انستاتیت قرار می‌گیرند و درصورتی‌که SiO_2 بین ۴۲ تا ۵۹/۵ باشد نقطه شروع ذوب و پایان تبلور P است.

بررسی روند تبلور:

از f عمود بر لیکوئیدوس می‌کشیم و ادامه می‌دهیم و ادامه مسیر را تا P می‌آییم از محل برخورد تا نقطه P فورستریت متبلور می‌شود. در این نقطه دما ثابت مانده و فورستریت به انستاتیت تبدیل می‌شود. هرچه محور f به a نزدیک‌تر باشد فورستریت کمتر و انستاتیت بیشتر است و روی محور a که منطبق بر انستاتیت است تمام فورستریت تبدیل به انستاتیت می‌شود. همچنین جدایش فورستریت قبل از نقطه واکنشی باعث غنی شدن ماگما از سیلیس می‌شود.

روند ذوب:
به سمت بالا ابتدا در نقطه P انستاتیت ذوب ناسازگار شده و به فورستریت + مایع تبدیل می‌شود. از مایع f با درصد ذوب بخشی کم مایع غنی از سیلیس ایجاد می‌شود و در ادامه در مسیر P تا f فورستریت ذوب می‌شود.

محدوده دوم (انستاتیت):
برای این مسیر مایع j را در نظر می‌گیریم:
ابتدا در نقطه برخورد با لیکوئیدوس فورستریت تشکیل شده و بعد در ادامه مسیر در نقطه P تمام فورستریت به انستاتیت تبدیل می‌شود. از نقطه P تا e دما ثابت بوده و کریستوبالیت و پروتوانستاتیت متبلور می‌شود.
روند ذوب عکس مراحل بالا صورت می‌گیرد.

۱) ذوب پروتوانستاتیت و کریستوبالیت
۲) ذوب عادی انستاتیت
۳) در نقطه P ذوب ناسازگار انستاتیت باعث ایجاد فورستریت + مایع می‌شود.
۴) در مسیر P تا j فورستریت ذوب می‌شود.

محدوده سوم (بین P و SiO_2):
نقطه پایان تبلور و شروع ذوب نقطه e (یوتکتیک) است که واکنشی نیست و مثل سیستم دوتایی ساده است.
در این نمودار از Mg_2SiO_4 تا نقطه P شامل سنگ‌های تحت اشباع و از نقطه P تا SiO_2 شامل سنگ‌های فوق اشباع می‌شود.

- ✓ **خصوصیات مهم سیستم دوتایی پریتکتیک یا دوتایی با ترکیب واکنشی:**

۱) برخلاف سیستم‌های دوتایی ساده که دمای نهایی تبلور و شروع ذوب ثابت و مشخص است (یوتکتیک) در این سیستم‌ها دمای نهایی تبلور و شروع ذوب متغیر و تابع ترکیب اولیه سیستم است.

۲) در سنگ‌هایی که دمای شروع ذوب آن‌ها نقطه واکنشی است (P) ابتدا یک کانی به‌صورت ناسازگار ذوب می‌شود.

۳) تفریق کانی متبلور شده قبل از نقطه واکنشی تغییرات مهمی در ترکیب و دمای نهایی سیستم ایجاد می‌کند.

۴) در شرایط تبلور تعادلی، دو کانی که در دو طرف یک سیستم هستند در یک سنگ دیده نمی‌شوند.

۵) از ذوب سنگ‌های اولترامافیک حاوی انستاتیت و الیوین فورستریت با درصد ذوب بخشی کم می‌توان ماگمای غنی از سیلیس به دست آورد.

- ✓ نکته: در نمونه‌هایی که ذوب متناقض یا ناجور است نقطه‌ای به‌نام نقطه واکنشی یا تحولی یا اُبرگانگ که آن را نقطه پرتکتیک گویند (P یا R).
- ✓ نکته: در دیاگرام‌های دوتایی ساده ترکیب اولیه با ترکیب نهایی تبلور از ذوب یکسان است ولی در دیاگرام‌های واکنشی ترکیب اولیه یا نهایی تبلور یا ذوب یکسان نیست.
- ✓ تذکر: در این دیاگرام‌ها بین R و E، ذوب جور یا عادی را داریم.

- ✓ تمرین اول (سیستم سیلیس – لوسیت):

۱- در AA': تبلور ترکیبات بین E و $Sio_۲$ ⇐ نقطه نهایی تبلور E است.

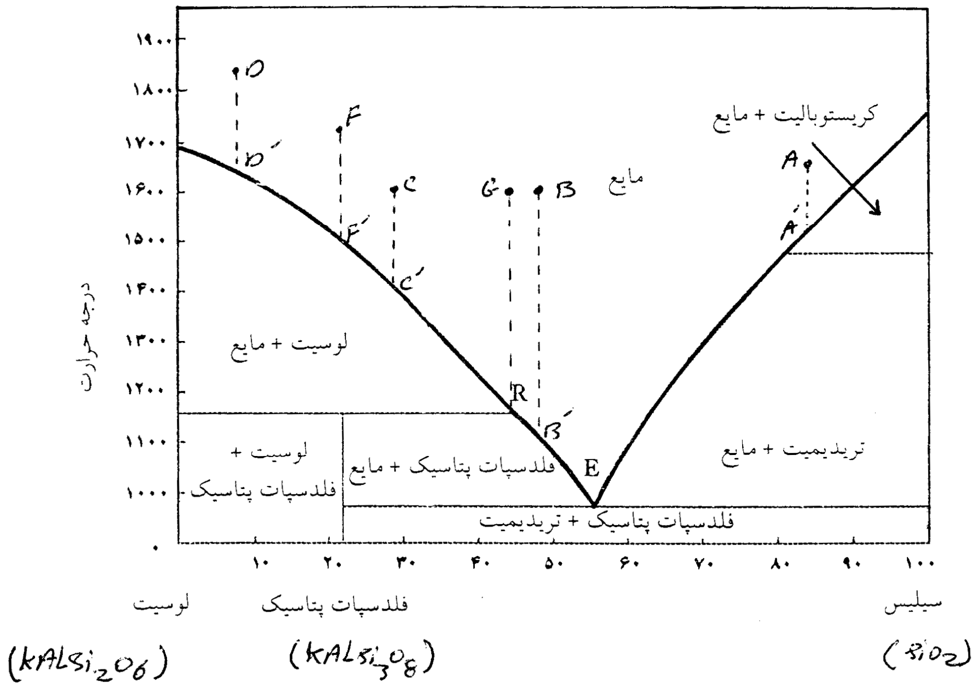
۲- در BB': تبلور ترکیبات بین E و R ⇐ نقطه نهایی تبلور E است.

۳-در CC': تبلور ترکیبات بین R و دیواره حد واسط ⇐ نقطه نهایی تبلور E است.

۴- در FF': تبلور ترکیبات روی دیواره حد واسط ⇐ نقطه نهایی تبلور R است.

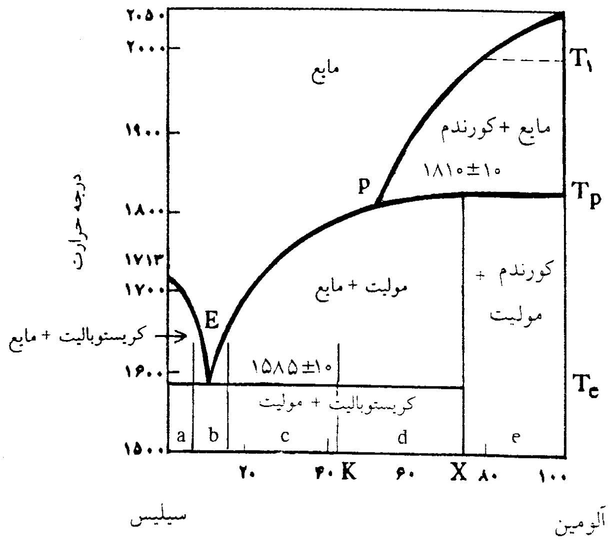
۵- در DD': تبلور ترکیبات بین L و دیواره حد واسط ⇐ نقطه نهایی R است.

۶- در GR: تبلور ترکیبات روی R یا P ⇐ نقطه نهایی E است.



✓ تمرین دوم (سیستم سیلیس – آلومین در فشار یک‌بار):

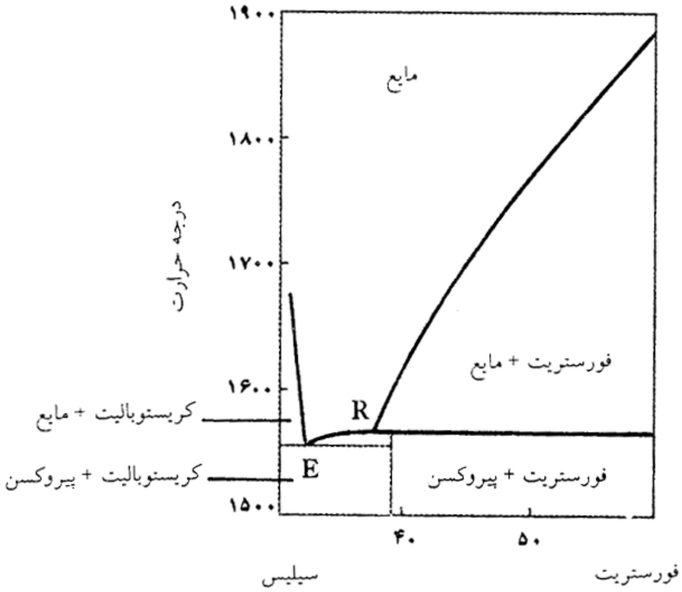
- در حرارت بالا در قطب Si، کریستوبالیت یا تریدیمیت و در قطب Al_2o_3، کرندون متبلور می‌شود. (حد واسط مولیت = $3Al_2O_3,2SiO_2$)



✓ تمرین سوم (سیستم سیلیس –فورستریت):

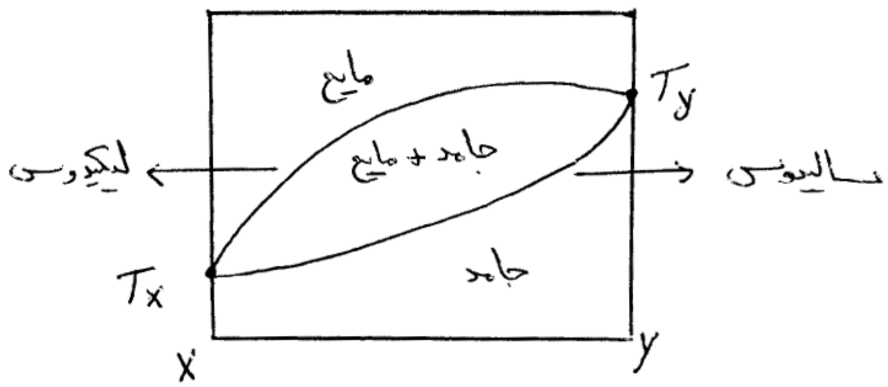
- در قطب Sio_2 سیلیس و در قطب Mg_2sio_4 فورستریت را داریم (حد واسط انستاتیت = $Mgsio_3$)

- نکته: در فشارهای ۳ تا ۵ کیلو بار انستاتیت به حالت طبیعی ذوب می‌شود.


۱۹۰۰
۱۸۰۰
۱۷۰۰
۱۶۰۰
۱۵۰۰
درجه حرارت
مایع
فورستریت + مایع
R
E
کریستوبالیت + مایع
کریستوبالیت + پیروکسن
فورستریت + پیروکسن
۴۰
۵۰
سیلیس
فورستریت

➢ دیاگرام‌های دوتایی محلول جامد

- نکته: کانی‌هایی با هم تشکیل محلول جامد می‌دهند که ۱- اختلاف شعاع یونی کمتر از ۰/۱۵ ۲- اختلاف بار الکتریکی کمتر از یک باشد.
- این دیاگرام منحنی لیکیدوس (مایع) و سالیدوس (جامد) دارد.
- تفسیر پدیده زونینگ با این منحنی امکان‌پذیر است.
- این دیاگرام فاقد نقطه یوتکتیک یا E است.
- همه واکنش‌ها در آن تعادلی می‌باشند.
- پدیده زونینگ یا زوناسیون:
- عوامل مؤثر بر زونینگ:
  - ۱- تغییر فشار بخار آب (آذرین خروجی)
  - ۲- سرد شدن سریع ماگما (خروجی‌ها)
  - ۳- اختلاط دو ماگما
  - ۴- اختلاط ماگما با دیواره
  - ۵- تغییر میزان غلظت ماگما (SiO_2).
- در دیاگرام‌های آن چون مایع باقیمانده در محفظه همچنان وجود دارد، کلیه واکنش‌ها غیر تعادلی است.



➢ سیستم‌های دوتایی با انحلال جامد کامل:

- موادی در این سیستم‌ها هستند سیستم تبلور یکسان داشته و از نظر شعاع و بار یونی قابلیت جایگزینی داشته باشند. (مثل آلبیت و آنورتیت با محلول جامد پلاژیوکلاز) و یا (فورستریت و فایالیت با محلول جامد الیوین).

- سیستم فورستریت ($Mg2SiO4$) ـ فایالیت ($Fe2SiO4$) با محلول جامد الیوین:
در این سیستم تمام قسمت‌ها شبیه پلاژیوکلازها است، تفریق ذوب و زونینگ ولی شکل منحنی آن برعکس است.
در سنگ‌های اولترابازیک و بازیک الیوین از نوع فورستریت است.
در سنگ‌های حد واسط الیوین از نوع فایالیت است.
الیوین سنگ‌های بازیک Mg و الیوین سنگ‌های حد واسط از نوع Fe است.

- سیستم آلبیت و آنورتیت با محلول جامد پلاژیوکلاز:
پلاژیوکلازهای اسیدی از نوع Na و پلاژیوکلازهای بازی از نوع Ca است. (لابرادوریت و آنورتیت)
در این سیستم Na و Ca قابلیت جابجایی دارند. در این سیستم‌ها فقط دو منحنی سالیدوس و لیکوئیدوس داریم. تغییرات دما و ترکیب روی منحنی لیکوئیدوس و تغییرات فاز جامد روی منحنی سالیدوس اتفاق می‌افتد.
مثال: مایع a (۶۵ درصد آنورتیت و ۳۵ درصد آلبیت):
از a به هر دو منحنی عمود می‌کنیم در برخورد با لیکوئیدوس (F) اولین جامد تشکیل می‌شود. برای تشخیص اینکه این جامد چه ترکیبی دارد از F به سالیدوس عمود می‌کنیم (G) که ۹۰ درصد آنورتیت و ۱۰ درصد آلبیت دارد خط عمود اول در نقطه I سالیدوس را قطع می‌کند که از آن بر لیکوئیدوس عمود می‌کنیم تا مایع را مشخص کنیم.
F و D و H به ترتیب مایعاتی اندکه تشکیل می‌شوند و با پلاژیوکلاز در تعادل‌اند. G و E و I به ترتیب پلاژیوکلازهایی هستند که تشکیل می‌شوند و جامدند.
قانون اهرم‌ها برای بررسی درصد فاز جامد و مایع استفاده می‌شود.

نقطه a:
همه را نسبت به خط ترکیب می‌سنجیم: برای شروع نقطه f را بررسی می‌کنیم. هر چیزی قبل از خط ترکیب است، مایع و هر چیزی بعد از خط ترکیب است مایع است. پس در نقطه f صددرصد مایع داریم.

نقطه d:

فاز جامد = (cd ÷ de) * ۱۰۰ = فاز مایع ۱۰۰ * (ce ÷ de)

نقطه h: در این نقطه صددرصد جامد داریم.

بررسی نحوه ذوب در سیستم دوتایی آلبیت ـ آنورتیت:

جامد a با ترکیب ۶۵ درصد آنورتیت و ۳۵ درصد آلبیت را بررسی می‌کنیم. از این نقطه خط عمودی به سمت بالا رسم کرده تا سالیدوس و لیکوئیدوس را قطع کند. در نقطه I ذوب شروع می‌شود. اولین مایعی که تشکیل می‌شود H است پس جامد I با مایع H در تعادل است. آخرین مایعی که تشکیل می‌شود F است که با جامد G در تعادل است.

- **خصوصیات مهم سیستم‌های دوتایی با انحلال جامد کامل:**

۱) دمای شروع ذوب و تبلور برای ترکیبات مختلف متفاوت بوده و بستگی به ترکیب اولیه دارد. در ضمن دما با تغییر فشار خشک و مرطوب تغییر می‌کند.

۲) دمای نهایی تبلور بستگی به نحوه تبلور دارد. در تبلور غیر تعادلی دمای نهایی به میزان زیاد کاهش می‌یابد.

۳) در هر لحظه از زمان تبلور، حذف فاز جامد از سیستم، دما و ترکیب نهایی را عوض می‌کند.

۴) از ذوب بخشی سنگ‌های حاوی پلاژیوکلاز و الیوین، با تغییر در میزان درصد ذوب ترکیبات متفاوت ایجاد می‌شود.

۵) در مرحله نهایی از دو مایع با ترکیب مختلف فقط یک فاز جامد متبلور می‌شود (پلاژیوکلاز یا الیوین) که پلاژیوکلازها در سنگ‌های اسیدی، حد واسط، بازیک و اولترابازیک دیده می‌شود یعنی در تمام سنگ‌های آذرین دیده می‌شود. نوع پلاژیوکلاز یا الیوین توسط ترکیب سنگ کنترل می‌شود.

➢ سیستم‌های دوتایی با انحلال جامد محدود (Solid Solution محدود):

یون‌ها توانایی جانشینی به‌صورت ۱۰۰ درصد را ندارند. مواد ایزومورف و هترومورف که شعاع کاتیون آن‌ها در حدی است که قابلیت جانشینی به‌صورت ۱۰۰ درصد را نداشته باشند تشکیل سیستم دوتایی با انحلال جامد محدود می‌دهند.

مثلاً اوژیت و هیپرستن و جانشینی بین یون‌های Ca و Mg و Fe

این‌ها سیستم دوتایی با انحلال جامد محدود را تشکیل می‌دهند.

این دو سیستم شبیه به هم می‌باشند.

✓ آلکالی فلدسپات:

در سیستم‌های دوتایی با انحلال جامد محدود منحنی سالووس، منحنی جدایی در فاز جامد است.

در فشار یک اتمسفر در ساختمان پتاسیم فلدسپات حداکثر ۶۵ درصد آلبیت جانشین می‌شود و برعکس در ساختمان سدیم فلدسپات حداکثر ۳۵ درصد ارتوز با پتاسیم فلدسپات جانشین می‌شود. به دلیل کوچک‌تر بودن شعاع یونی سدیم مقدار بیشتری آلبیت در شبکه پتاسیم فلدسپات جانشین می‌شود.

در مرحله نهایی تبلور برای ترکیبات واقع بین نقطه مینیمم (m) و محور پتاسیم فلدسپات، آلکالی فلدسپات از نوع ارتوز است (پتاسیک) و برای ترکیباتی که بین نقطه m و محور سدیم فلدسپات اند، آلکالی فلدسپات از نوع آلبیت خواهد بود (سدیک). در اعماق کم و فشار ۱ اتمسفر فقط یک آلکالی فلدسپات متبلور می‌شود (یا آلبیت یا ارتوز)

در صورت سرد شدن این مایع به علت اختلاف در شعاع یونی به فلدسپات سدیک و پتاسیک تفکیک می‌شود. به این فرایند جدایی در فاز جامد یا (Exolution) می‌گویند. این جدایش زیر منحنی سالیدوس اتفاق می‌افتد و تشکیل بافت پرتیت و آنتی پرتیت می‌دهد.

در پتاسیم فلدسپات (در ارتوز) که مقدار آلبیت آن از ۲۵ درصد کمتر باشد و در سدیم فلدسپاتی که (در آلبیت) که مقدار ارتوز آن از ۷ درصد کمتر باشد، جدایش اتفاق نمی افتد چون در محدوده سالووس قرار نمی‌گیرد.

- **پرتیت و آنتی پرتیت:**

اگر آلکالی فلدسپات اول (زمینه) از نوع پتاسیک باشد و آلبیت از آن به اشکال و اندازه‌های مختلف جدا شود به آن پرتیت و برعکس آن را آنتی پرتیت گویند.

بر اساس اندازه و سرعت سرد شدن سه نوع پرتیت داریم:

۱) پرتیت اشعه X

۲) کریپتوپرتیت (میکروسکپی)

۳) ماکروپرتیت (ماکروسکپی)

در سنگ‌های آتش‌فشانی به دلیل سرد شدن سریع سنگ پرتیت و آنتی پرتیت نوع اول و دوم داریم. فلدسپاتی که در سنگ‌های آتش‌فشانی دیده می‌شود سانیدین است.

پرتیت در سانیدین از نوع اشعه X کریپتو است و در ارتوز، کریپتو یا ماکرو

ارتوزی که در سنگ‌های آذرین درونی متبلور شده، پرتیت از نوع کریپتو و به‌ندرت ماکرو خواهد بود.

میکروکلین به دلیل تبلور در اعماق زیاد، پرتیت از نوع ماکرو دارد.

تغییرات این سیستم در فشارهای خشک و مرطوب را در تصویر مشاهده می‌کنید.

اولین منحنی (dry) یعنی خشک و فشار یک اتمسفر

با افزایش بخار آب درجه حرارت (سالیدوس و لیکوئیدوس) کاهش می‌یابد.

محدوده پایداری لوسیت کاهش می‌یابد. در فشار یک کیلو بار دما باز کاهش پیدا می‌کند و لوسیت کمتر می‌شود

ترکیب نقطه مینیمم به سمت آلبیت می‌رود.

در فشار ۲ کیلوبار، کاهش دما، حرکت نقطه مینیمم و کاهش لوسیت

در فشار ۳ کیلوبار لوسیت حذف می‌شود.

در فشار ۲/۵ کیلوبار مرطوب، ذوب پتاسیم فلدسپات عادی می‌شود.

در فشار ۴ کیلوبار باز هم افت دما حرکت به سمت آلبیت و حذف لوسیت را داریم

در فشار ۵ کیلوبار مرطوب، منحنی سالووس و سالیدوس یکدیگر را قطع می‌کنند و تشکیل سیستم دوتایی انحلال جامد محدود با نقطه یوتکتیک می‌دهد.

در ۵ کیلوبار یعنی شرایط عمیق در تشکیل توده‌های آذرین، شروع ذوب و تبلور از نقطه یوتکتیک است.

نکات:

- نقطه اتکتیک یا یوتکتیک E ← درجه آزادی V=0
- در نقطه E به علت ناخالص بودن، دمای ذوب یا تبلور پایین‌تر از حد طبیعی است.
- با افزایش فشار (P) سطح لیکیدوس افت می‌کند.
- در درجه حرارت ثابت و فشار متغیر (فشار خشک) منحنی‌های لیکیدوس و نقطه اتکتیک معکوس می‌شود.
- منحنی سولووس قلمرو سری پیوسته حرارت بالا و سری ناپیوسته حرارت پایین را از هم جدا می‌کند.

- پرتیت: معادل سانیدین حرارت پایین
- آنتی پرتیت: معادل آنورتوز حرارت پایین

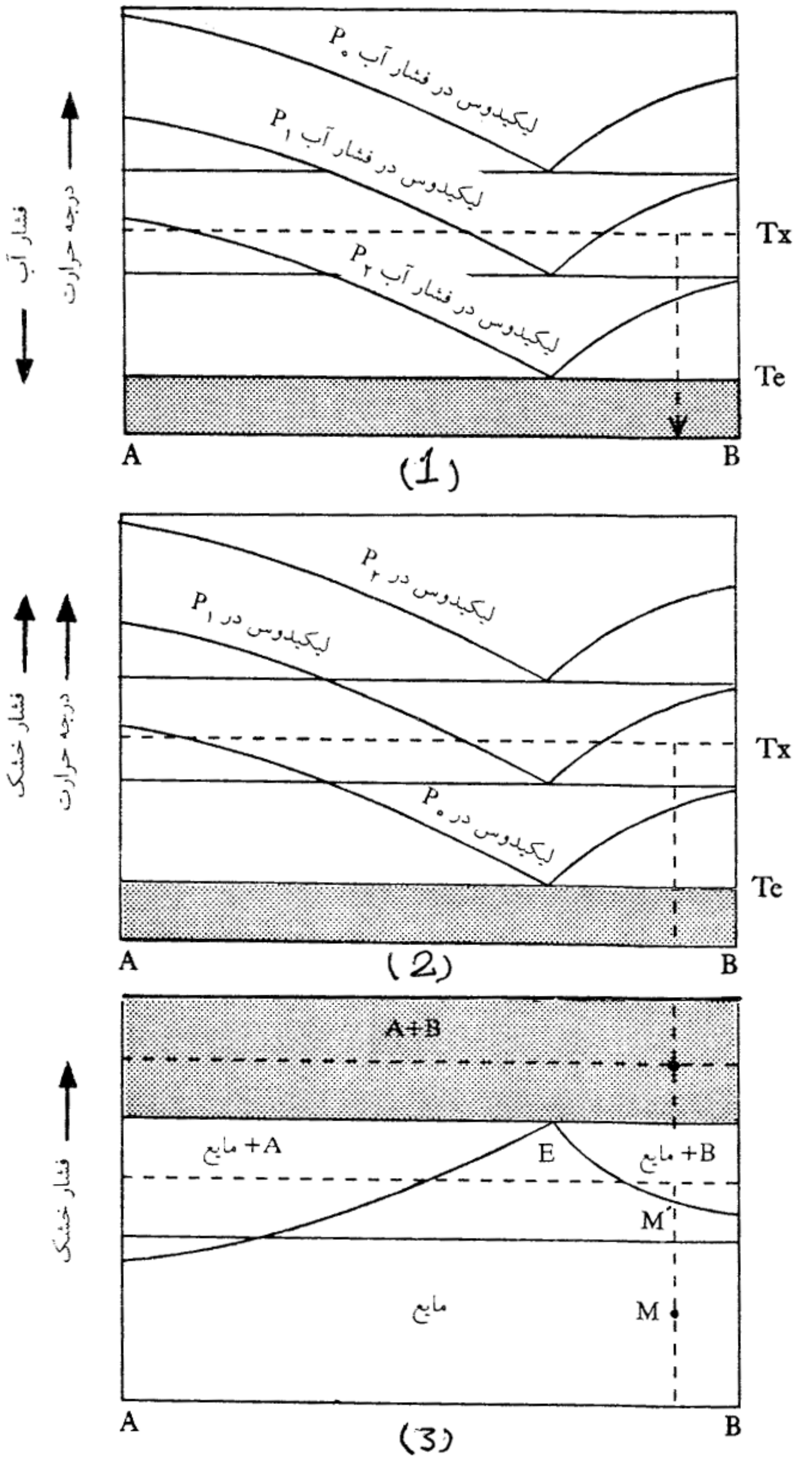
- محلولهای جامد (با توجه به ساختمان بلورین):
  - محلول جامد بین ذره‌ای: اتم‌ها در فضای بین شبکه‌ای (فلزات).
  - محلول جامد حذف شده یا ناقص: فقدان بعضی از اتم‌ها (پیروتیت).

- در سیستم‌های دو تشکیل‌دهنده بدون محلول جامد، فشار در نظر گرفته نمی‌شود (کندانسه)
- در هر سیستم دوتایی درجه حرارت ذوب یا انجماد در نقطه اتکتیک پیوسته ثابت است.

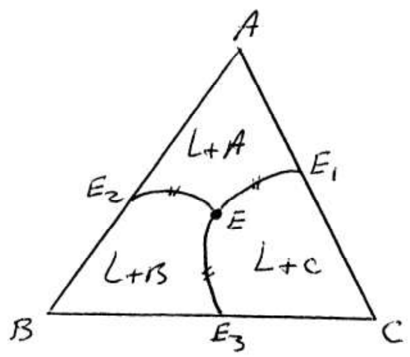
- در نقطه اتکتیک مقدار کاهش درجه حرارت با مقدار ناخالصی نسبت مستقیم و با درجه حرارت ذوب نسبت عکس دارد.

- فشار خشک باعث بالا رفتن درجه حرارت تشکیل دهنده‌ها مخلوط آن‌ها می‌گردد.
- با افزایش فشار آب، درجه حرارت پایین می‌آید، در فشارهای بالاتر این روند کند می‌شود.

- تغییرات لیکیدوس و درجه حرارت نقطه اتکتیک E در حالتی که فشار آب تغییر کند.
- همان تغییرات وقتی که فشار بدون حضور آب و به‌اصطلاح فشار خشک باشد.
- اگر درجه حرارت ثابت و فشار متغیر باشد، منحنی‌های لیکیدوس و نقطه اتکتیک معکوس می‌شود.


لیکیدوس در فشار آب P_0
لیکیدوس در فشار آب P_1
لیکیدوس در فشار آب P_2
فشار آب
درجه حرارت
Tx
Te
A
B
(1)
لیکیدوس در P_2
لیکیدوس در P_1
لیکیدوس در P_0
فشار خشک
درجه حرارت
Tx
Te
A
B
(2)
A+B
A+ مایع
E
B+ مایع
M'
مایع
M
فشار خشک
A
B
(3)

سیستم‌های سه تایی: (C=3)



- سیستم‌های سه‌تائی از سه ترکیب متفاوت تشکیل شده اند.
- فاز دیاگرام این سیستم‌ها به شکل یک مثلث متساوی‌الاضلاع است که روی هر رأسش یک ترکیب قرار گرفته. مقدار هر ترکیب در همان رأس برابر ۱۰۰ و روی ضلع مقابل صفر است.
- دارای خطوط حرارتی یا ایزوترم (//) است.
- در رأس، یک سازنده، اضلاع، دو سازنده و در داخل مثلث برای هر نقطه سه سازنده وجود خواهد داشت.
- برای اینکه ترکیب یک ماده داخل مثلث را تعیین کنیم ابتدا یک خط افقی از A به‌موازات ضلع پایین رسم می‌کنیم. سپس از همین نقطه یک خط دیگر به‌موازات یکی دیگر از اضلاع مثلث رسم می‌کنیم. در این حالت مثلث به سه محدوده تقسیم می‌شود.

- یک سیستم سه‌تائی ساده از سه سیستم دوتایی ساده تشکیل می‌شود. هر سیستم دوتایی ساده یک نقطه یوتکتیک دارد؛ بنابراین سه‌نقطه یوتکتیک داریم که در یک نقطه مثلث یکدیگر را قطع می‌کنند. یعنی پایین‌ترین نقطه تبلور و شروع ذوب.
- بعضی جاها به این نقطه کوتکتیک هم گفته می‌شود.
- نقطه‌ای بنام اتکتیک سه‌تایی یا کوتکتیک E دارند.
- قانون فازها در سیستم سه‌تائی:

$$F = C - P + 1$$

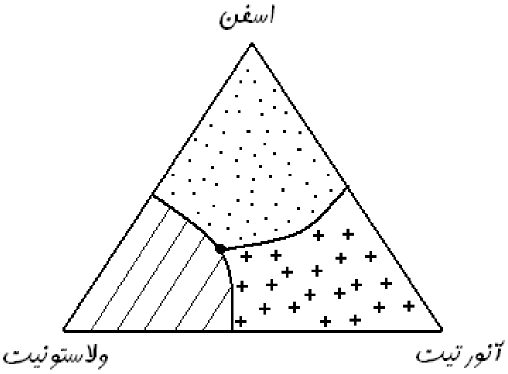
- در این سیستم‌ها دما در بعد سوم نشان داده می‌شود. برش‌های ایزوترم یا هم‌دما در این سیستم‌ها به شکل خطوط توپوگرافی دیده می‌شود.
- درجه آزادی در نقطه یوتکتیک:

$$F = C - P + 1 \rightarrow 0 = 3 - P + 1 \rightarrow P = 4$$

- در سیستم‌های سه‌تائی همزمان ۴ فاز با هم در تعادل‌اند، سه فاز جامد و یک مایع
- در این سیستم‌ها روی منحنی‌های یوتکتیک ۲ کامپوننت داریم.

$$F = C - P + 1 \rightarrow 1 = 2 - P + 1 \rightarrow P = 2$$

- روی منحنی‌های یوتکتیک در هر لحظه دو فاز متبلور یا ذوب می‌شوند.
- فرمول فازها (C=3) در آن‌ها معادل سیستم‌های دوتایی است.
- فرمول فازها $(C=۳)$ $V+P=C+۱$
- در نقطه E: $(A+B+C+Liquid)$, $3+1=V+4$ ← V=0



سیستم سه تایی

مهم‌ترین سیستم‌های سه‌تائی:

۱) سیستم سه‌تائی ساده
۲) سیستم ساده با ترکیب واکنشی
۳) سیستم سه‌تائی با انحلال جامد کامل
۴) سیستم سه‌تائی با انحلال جامد محدود

- قانون اهرم‌ها در سیستم‌های سه‌تائی ساده:

برای مشخص شدن مسیر تبلور عمود می‌کنیم به رأس مربوطه و ادامه می‌دهیم تا منحنی کوتکتیک را قطع کند.

- ترکیب A در نقطه B:

(AB ÷ BC) × 100 = درصد فاز جامد در نقطه B برای ترکیب A
(AC ÷ BC) × 100 = درصد فاز مایع در نقطه B برای ترکیب A
(AE ÷ EF) × 100 = درصد فاز جامد در نقطه E برای ترکیب A
(AF ÷ EF) × 100 = درصد فاز مایع در نقطه E برای ترکیب A

- بررسی روند تبلور در سیستم سه‌تائی آنورتیت ـ ولاستونیت ـ اکسید سیلیس:

از نقطه X به سمت A آنورتیت متبلور می‌شود.
در نقطه A همزمان با آنورتیت، تریدیمیت هم متبلور می‌شود.
از A به سمت E تریدیمیت و آنورتیت متبلور می‌شود.

در نقطه E همزمان هر سه فاز تریدیمیت، آنورتیت و ولاستونیت تشکیل می‌شوند در این نقطـه دمـا ثابت می‌شود تا تمام مایع تبدیل به جامد شود.

تذکر: با تفریق یا جداسازی کانی‌های متبلور شده تغییری در دما و ترکیب نهـایی ایجـاد نمـی‌شـود چون دمای یوتکتیک ثابت و مشخص است.

- ذوب در سیستم‌های سه‌تائی ساده:

در این سیستم‌ها شروع ذوب نقطه یوتکتیک است.

جامد X را حرارت می‌دهیم. قبل از اینکـه بـه نقطـه یوتکتیـک (شـروع ذوب) برسـد تغییـرات پلـی مورفیک اتفاق می‌افتد؛ مـثلاً کـوارتز α بـه کـوارتز ß و کـوارتز ß بـه تریـدیمیت، ولاسـتونیت بـه ولاستونیت کاذب و آنورتیت به آنورتیت حرارت بالا تبدیل می‌شود.

در دمای E هر سه فاز همزمان شروع به ذوب می‌کنند که ولاستونیت کاملاً ذوب می‌شـود چـون از همه کمتر است. پس ولاستونیت به همراه مقداری از دو فاز دیگر ذوب می‌شود.

در مسیر E تا A تریدیمیت و آنورتیـت ذوب می‌شـوند. در نقطـه A تمـام تریـدیمیت و مقـداری از آنورتیت ذوب می‌شود.

درنهایت در مسیر A تا X باقی‌مانده آنورتیت ذوب می‌شود.

مذابی که به یوتکتیک نزدیک‌تر باشد سریع‌تر متبلور می‌شـود و سـنگ حاصـل دانـه‌ریز می‌شـود و مذابی که با یوتکتیک فاصله دارد دیرتر متبلور شده و سنگ حاصل دانه‌درشت می‌شود.

در سنگ‌هایی که ترکیب آن‌ها به نقطه یوتکتیک نزدیک است در مقایسـه بـا آن‌هـایی کـه فاصـله زیادی دارند درصد مذاب تولید شده در دمای ثابت یوتکتیک (E) بیشتر خواهد بود.

تغییرات در حجم و اندازه توده‌های نفوذی واقع در یـک کمربنـد را کـه هـم سـن بـوده و ترکیـب شیمیایی نزدیک به هم دارند می‌توان بـه متغیـر بـودن ترکیـب سـنگ مـادر ربـط داد. در توده‌هـای بزرگ ترکیب سنگ منشأ به دمای شروع ذوب نزدیک بوده درصورتی‌کـه در توده‌هـای کوچـک ترکیب سنگ منشأ از نقطه شروع ذوب فاصله بیشتری دارد. ترکیب ماگمای اُبسـیدین و شیشـه‌های طبیعی در محدوده یوتکتیک قرار دارد بنابراین قبل از رسیدن بـه سـطح زمـین هـیچ تبلـوری در آن رخ نمی‌دهد و در سطح زمین به‌سرعت سرد شده و تبدیل به شیشه می‌شوند.

ترکیباتی می‌توانند تشکیل سیستم سه‌تائی از نوع واکنشی دهند که دارای خاصـیت ذوب ناسـازگار داشته باشند.

- مهم‌ترین سیستم‌های سه‌تائی با ترکیب واکنشی:

۱) سیستم لوسیت ـ آنورتیت ـ سیلیس با ترکیب واکنشی پتاسیم فلدسپات

۲) سیستم آنورتیت ـ فورستریت ـ سیلیس با ترکیب واکنشی انستاتیت

- **سیستم لوسیت ـ آنورتیت ـ سیلیس:**

از پتاسیم فلدسپات خطی به آنورتیت رسم می‌کنیم در این صورت سیستم سه‌تائی ما به دو سیستم سه‌تائی تبدیل می‌شود.

برای همه ترکیباتی که در مثلث آنورتیت ـ لوسیت ـ K فلدسپات (مثلث کوچک) قرار دارند نقطه پایان تبلور و شروع ذوب نقطه D (نقطه واکنشی) است.

برای همه ترکیباتی که در مثلث آنورتیت ـ سیلیس ـ K فلدسپات (مثلث بزرگ) نقطه پایان تبلور و شروع ذوب نقطه C است که دمایش از D کمتر است. اینجا دیگر نقطه یوتکتیک نداریم.

- بررسی تبلور مایع S:

به رأس آنورتیت رسم می‌کنیم و ادامه می‌دهیم تا کوتکتیک را در نقطه R قطع کند. S در R متبلور می‌شود.

از S تا R فقط آنورتیت متبلور می‌شود و در نقطه R آنورتیتو لوسیت همزمان با هم متبلور می‌شوند. از R تا D آنورتیت و لوسیت با هم متبلور می‌شوند. در نقطه D آنورتیت تشکیل شده و لوسیت با مایع واکنش انجام داده و تبدیل به پتاسیم فلدسپات می‌شود.

ترکیب اولیه هرچه به محور لوسیت نزدیک‌تر باشد در نقطه D لوسیت بیشتری باقی می‌ماند و بر عکس.

- بررسی تبلور مایع V:

به رأس لوسیت رسم می‌کنیم و ادامه می‌دهیم تا کوتکتیک را در U قطع کند. از V تا U لوسیت متبلور می‌شود. در نقطه U لوسیت به‌صورت تبلور ناسازگار با مایع واکنش داده و به پتاسیم فلدسپات تبدیل می‌شود.

باز هم مقداری لوسیت باقی می‌ماند. در نقطه D دما ثابت مانده و همزمان آنورتیت و پتاسیم فلدسپات و لوسیت متبلور می‌شوند.

- بررسی تبلور مایع T:

چون T در مثلث بزرگ قرار دارد دمای نهایی تبلور C است. این بار به رأس لوسیت رسم کرده و ادامه می‌دهیم. از T تا U لوسیت متبلور می‌شود. در U لوسیت تبدیل به پتاسیم فلدسپات شده (به‌صورت ناسازگار). از U تا D باز هم لوسیت تبدیل به پتاسیم فلدسپات می‌شود.

چون T بعد از محور K فلدسپات است در نقطه D تمام لوسیت به پتاسیم فلدسپات تبدیل می‌شود. در این نقطه همزمان آنورتیت هم تشکیل شده و از D تا C آنورتیت و پتاسیم فلدسپات تشکیل

می‌شود پس در اینجا تبلور K فلدسپات در مسیر D تا C سازگار یا عادی است؛ و درنهایت در C همزمان آنورتیت، پتاسیم فلدسپات و تریدیمیت تشکیل می‌شوند.

- بررسی تبلور مایع A:

عمود می‌کنیم به رأس سیلیس و ادامه می‌دهیم. ابتدا از A کریستوبالیت تشکیل می‌شود. وقتی دما به 1470°C درجه رسید به تریدیمیت تبدیل می‌شود.
در نقطه B تریدیمیت و آنورتیت متبلور می‌شوند و از B تا C هم تریدیمیت و آنورتیت تشکیل می‌شوند. در نقطه C همزمان تریدیمیت و آنورتیت و پتاسیم فلدسپات به‌صورت سازگار متبلور می‌شود و دما ثابت می‌ماند تا تمام مایع به جامد تبدیل شود.
برای دو مایع S و V که نقطه پایان تبلور نقطه D است جداسازی بلورها (تفریق) باعث غنی شدن مایع باقی‌مانده از سیلیس می‌شود و تغییر در ترکیب نهایی می‌شود، به‌طوری‌که از D به سمت C دما کاهش می‌یابد.

- بررسی روند ذوب ترکیب S:

شروع ذوب نقطه D است. در D همزمان آنورتیت و پتاسیم فلدسپات ذوب می‌شود. در این نقطه ذوب ناسازگار پتاسیم فلدسپات ایجاد لوسیت می‌کند. پس از تبدیل کامل پتاسیم فلدسپات به لوسیت با افزایش دما در مسیر D تا R لوسیت و آنورتیت ذوب می‌شوند و از R تا S آنورتیت ذوب می‌شود.

- بررسی روند ذوب ترکیب T:

شروع ذوب نقطه C است. در این نقطه همزمان تریدیمیت، آنورتیت و پتاسیم فلدسپات ذوب می‌شوند ... دما در این نقطه ثابت می‌ماند تا تمام تریدیمیت و مقداری از پتاسیم فلدسپات و آنورتیت ذوب شود. سپس در مسیر C تا D آنورتیت و پتاسیم فلدسپات ذوب می‌شوند. در نقطه D همزمان پتاسیم فلدسپات و آنورتیت ذوب شده و ذوب ناسازگار پتاسیم فلدسپات ایجاد لوسیت می‌کند. از D تا U پتاسیم فلدسپات به طریق ناسازگار تبدیل به لوسیت می‌شود و از U تا T لوسیت ذوب می‌شود.

در نمودارهای بعدی دمای واکنشی برای مثلث کوچک‌تر B است و برای مثلث بزرگ‌تر E.

➢ سیستم‌های سه‌تائی با انحلال جامد کامل:

- **سیستم دیوپسید ـ آنورتیت ـ آلبیت:**

در این سیستم بین دیوپسید و آنورتیت یک سیستم دوتایی ساده است با نقطه یوتکتیک دمای 1275°C که با e نشان می‌دهند و بین دیوپسید و آلبیت هم یک سیستم دوتایی ساده است (دمای

نقطه یوتکتیک 1100°C است) از اتصال این دونقطه یوتکتیک یک منحنی کوتکتیک رسم می‌شود.

بین آلبیت و آنورتیت یک سیستم دوتایی با انحلال جامد کامل است.

بررسی روند تبلور A:

از A به رأس دیوپسید وصل می‌کنیم و ادامه می‌دهیم. در نقطه A و از A تا B دیوپسید متبلور می‌شود. از B تا F دیوپسید و پلاژیوکلاز با هم تشکیل می‌شود. برای به دست آوردن ترکیب پلاژیوکلاز از PF عمود می‌کنیم بر لیکوئیدوس و سالیدوس. از نقطه برخورد با لیکوئیدوس عمود می‌کنیم بر سالیدوس تا اولین پلاژیوکلاز به دست آید. از لیکوئیدوس عمود می‌کنیم بر سالیدوس P1 به دست می‌آید که همزمان با دیوپسید در نقطه B به وجود آمده است. برای به دست آوردن دما و ترکیب نهایی از PF خطی به‌موازات خط P1 – B رسم می‌کنیم که اسم آن را F می‌گذاریم که از B تا F پلاژیوکلاز تشکیل می‌شود.

درصورتی‌که تبلور تعادلی نباشد یعنی پلاژیوکلازها را همزمان با تبلور از سیستم جدا کنیم (تفریق) دما و ترکیب نهایی سیستم تغییر می‌کند؛ مثلاً در دمای H تمام پلاژیوکلاز و دیوپسید را از سیستم جدا می‌کنیم، مایع باقی‌مانده به‌عنوان یک ترکیب جدید شروع به تبلور می‌کند.

از H که مایعی جدید است وصل می‌کنیم به دیوپسید و ادامه می‌دهیم که در نقطه PE ضلع مقابل را قطع می‌کند. سپس PE را بر سالیدوس و لیکوئیدوس عمود کرده و مثل قبل عمل می‌کنیم که PH به دست می‌آید. از H به PH خط می‌کشیم و از PE به‌موازات PH خطی رسم کرده که در نقطه E قطع می‌شود پس از H تا E پلاژیوکلاز جدید تشکیل می‌شود و پایان تبلور در این محدوده است که اسیدی‌ترند یعنی آلبیت بیشتر و دما نسبت به F کمتر و ترکیب سدیک تر شد

- **سیستم سه‌تائی سیلیس ـ نفلین ـ کلسالیت (ایزومورف نفلین):**

این مثلث را به دو محدوده تقسیم می‌کنیم. محدوده بالا شامل سیلیس، آلبیت و ارتوز است که برای این ترکیبات نقطه نهایی تبلور M است. در این مثلث سنگ‌های اشباع از سیلیس قرار می‌گیرند.

با کاهش سیلیس وارد محدوده آلبیت، ارتوز، نفلین و کلسالیت می‌شویم. برای این ترکیبات دمای نهایی تبلور N است که محدوده سنگ‌های آلکالن (پرآلکالن) تحت اشباع است. در واقع خط آلبیت ـ ارتوز مرز بین سنگ‌های اشباع و تحت اشباع است.

در این نمودارها خطوطی که شبیه منحنی‌های توپوگرافی هستند برش‌های ایزوترم یا هم دما می‌باشند.

➢ سیستم سه‌تائی با انحلال جامد محدود بین آلبیت و ارتوز:

- **سیستم سیلیس ـ آلبیت ـ ارتوز:**

در این سیستم بین سیلیس ـ آلبیت و سیلیس ـ ارتوز سیستم دوتایی ساده داریم.

بین آلبیت و ارتوز سیستم دوتایی با انحلال جامد محدود داریم.

این نمودار در فشار استاندارد 1 atm رسم شده پس برای مطالعه سنگ‌های آتش‌فشانی اسیدی مناسب است. خطی که به‌صورت نقطه‌چین مشخص شده همان کوتکتیک است که در واقع دو نقطه یوتکتیک را به هم وصل می‌کند. در زیر خط کریستوبالیت ـ تریدیمیت، کریستوبالیت پایدار نیست.

روی کوتکتیک در هر لحظه همزمان با تریدیمیت یک آلکالی فلدسپات هم تشکیل می‌شود.

- بررسی روند تبلور A:

مایع A مسیر A – D را طی می‌کند تا به کوتکتیک برسد. در نقطه A آلکالی فلدسپات تشکیل می‌شود. برای به دست آوردن نوع آلکالی فلدسپات A را به D وصل کرده و ادامه می‌دهیم تا خط آلبیت ارتوز را در نقطه E قطع کند.

E اولین آلکالی فلدسپات است.

از A به رأس SiO2 وصل می‌کنیم و ادامه می‌دهیم تا ضلع آلبیت ـ ارتوز را در نقطه B قطع کند. B آخرین آلکالی فلدسپات است. از B خطی به‌موازات DE رسم می‌کنیم تا کوتکتیک را در نقطه G قطع کند. G دمای نهایی است.

- بررسی روند تبلور H:

در این نقطه ابتدا لوسیت متبلور می‌شود. سپس با مایع واکنش داده و تشکیل آلکالی فلدسپات می‌دهد. H را به L وصل می‌کنیم و ادامه می‌دهیم تا این ضلع را در نقطه M قطع کند. پس M اولین آلکالی فلدسپات است. برای به دست آوردن ترکیب نهایی از H به رأس SiO2 وصل می‌کنیم و ادامه می‌دهیم تا ضلع آلبیت ـ ارتوز را در نقطه O قطع کند. برای به دست آوردن دمای نهایی از O خطی به‌موازات ML رسم می‌کنیم تا کوتکتیک را در نقطه N قطع کند.

در واقع N دمای نهایی سیستم است.

- **سیستم سه‌تایی سیلیس ـ آلبیت ـ ارتوز در فشار مختلف بخار آب:**

در شکل A فشار بخار آب وجود ندارد.

در شکل B فشار $200\ kg/cm^2$ است یعنی 0.2 Kbar

در شکل C فشار بخار آب 4 Kbar است و به دلیل فشار زیاد بخار آب، کوارتز درجه بالا تشکیل شده است.

ـ محدوده لوسیت و تریدیمیت کم می‌شود.

ـ کریستوبالیت حذف می‌شود.

ـ کوارتز β زیاد می‌شود.

در شکل D و فشار 2 Kbar، تریدیمیت حذف می‌شود. لوسیت کم می‌شود. کوارتز β و فلدسپات بیشتر می‌شوند.
در شکل E و فشار 3 Kbar، لوسیت حذف شده و کوارتز β زیاد می‌شود. فلدسپات هم همچنان وجود دارد.
در شکل F و فشار 3.5 Kbar، کوارتز α (دما پایین) شروع به تبلور می‌کند. محدوده کوارتز β کم می‌شود.
در شکل G و فشار 4 Kbar، کوارتز α زیاد و کوارتز β و فلدسپات کم می‌شوند.
در شکل H و فشار 6 Kbar، کوارتز α زیاد و کوارتز β کم می‌شود. فلدسپات تبدیل به سدیک و پتاسیک تبدیل می‌شود. در فشار حدود 5 Kbar منحنی سالیدوس و سالووس یکدیگر را قطع می‌کنند و همزمان دو نوع آلکالی فلدسپات متبلور می‌شود.
در فشار 10 Kbar کوارتز β حذف و فقط کوارتز α داریم و محدوده فلدسپات هم کم می‌شود. در ضمن دو نوع فلدسپات هم در حال تشکیل است.

- تأثیرات افزایش فشار بخار آب:
  - کاهش دمای ذوب و تبلور
  - ایجاد پلی مورفهای پایدارتر کوارتز و آلکالی فلدسپات
  - افزایش محدوده کوارتز
  - کاهش محدوده لوسیت (در فشار ۲/۵ تا ۳ کیلوبار لوسیت حذف می‌شود)

- توتل، باون و لوت گرانیت‌ها را به دو دسته تقسیم کردند:
  ۱) هیپرسالووس: در این گرانیت‌ها یک نوع آلکالی فلدسپات متبلور می‌شود. پس فشار بخار آب کمتر از 5 Kbar بوده و منحنی سالووس و سالیدوس یکدیگر را قطع نکرده بودند. پس در این بافت‌ها پرتیت و آنتی پرتیت هم دیده می‌شود.
  ۲) ساب سالووس: در این گرانیت‌ها دو نوع آلکالی فلدسپات متبلور می‌شود. یعنی فشار بخار آب بیشتر از 5 Kbar بوده است؛ بنابراین سالووس و سالیدوس یکدیگر را قطع کرده‌اند.

- **سیستم آلبیت ـ ارتوز ـ سیلیس در فشار 5 Kbar:**

در سیستم دوتایی در نقطه D همزمان ۲ آلکالی فلدسپات تشکیل می‌شود (A و B) در سیستم سه‌تائی یک کامپوننت دیگر هم وجود دارد ($SiO2$) یعنی ۳ عامل مؤثر است. دمای نقطه D از نقطه C کمتر است.

دمای D را روی سیستم دوتایی با انحلال جامد کامل منتقل می‌کنیم. در این دما ۲ آلکالی فلدسپات E و F تشکیل شده است.

تمام نقاط A و B و E و F را روی خط بالا منتقل می‌کنیم (آلبیت ـ ارتوز)

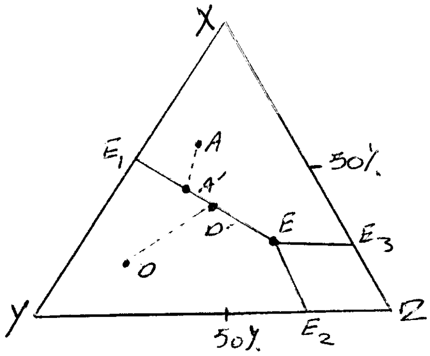
در مثلث سیلیس ـ آلبیت ـ E درنهایت کوارتز و سدیم فلدسپات متبلور می‌شود که بعداً ممکن است تشکیل آنتی پرتیت بدهد.

در مثلث سیلیس ـ ارتوز ـ F درنهایت کوارتز و یک نوع پتاسیم فلدسپات متبلور می‌شود و بعداً در یک حالت خاص ممکن است تشکیل پرتیت بدهد.

در مثلث سیلیس ـ E ـ F در هر لحظه کوارتز و ۲ نوع آلکالی فلدسپات تشکیل می‌شود. G و J را به هم وصل کرده و ادامه می‌دهیم تا این ضلع را در I قطع کند پس ترکیب G در نقطه I پتاسیم فلدسپات I تشکیل می‌شود

در نقطه J پتاسیم فلدسپات K و I همزمان تشکیل می‌شود.

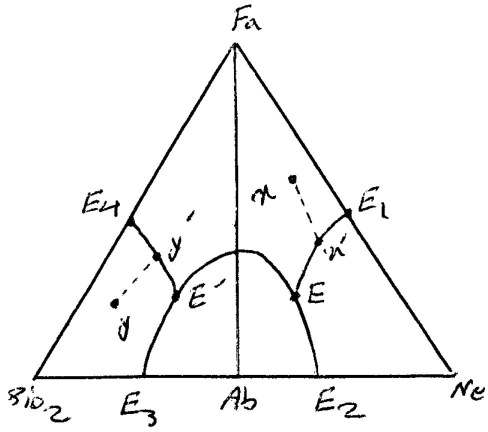
➢ دیاگرام‌های سه‌تایی ساده:



- تبلور A (۵۰٪ سازند X، ۱۰٪ Z، ۴۰٪ Y):
  - ابتدا محل A را مشخص می‌کنیم، $y-E_1-E-E_3$ سطح لیکیدوس می‌شود.
  - چون A در قلمرو X قرار دارد، خطی به رأس x وصل می‌کنیم و ادامه می‌دهیم تا در A' منحنی حرارتی را قطع کند.
  - در مسیر A تا A'، X متبلور و در A'، y نیز شروع به تبلور می‌کند. پس در مسیر $A'E$، Y, X متبلور شده تا اینکه در نقطه E همزمان با آن‌ها Z نیز متبلور و تبلور خاتمه می‌یابد.
  - نکته: اگر A بر روی E واقع شود هر سه سازند همزمان متبلور می‌شوند.

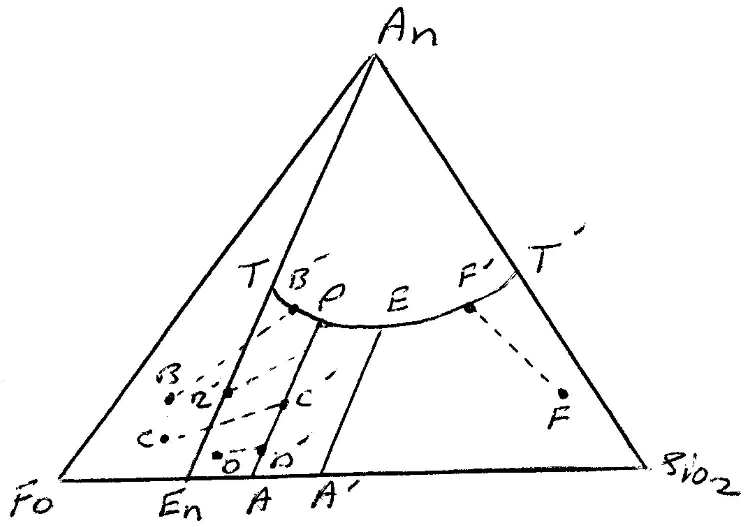
- ذوب D:
  - محدوده‌ای که نمونه مورد نظر در آن قرار دارد آخرین سازنده‌ای است که ذوب می‌گردد.
  - شروع ذوب از E است و در آن سازنده‌ای که در قلمرو ترکیب نیست، تماماً ذوب می‌شود ذوب D از نقطه E آغازشده که در آنجا تمام Z و مقداری از X,Y ذوب می‌گردد.
  - مابقی عمل ذوب روی منحنی حرارتی ED' که منحنی حرارتی مشترک X, Y است ادامه می‌یابد و در این مسیر فقط X, Y ذوب می‌شود تا در نقطه D' دومین سازند یعنی x کاملاً ذوب شده و فقط Y در مسیر DD' به ذوب خود ادامه می‌دهد تا در D آخرین بلور نیز ذوب شود و کار خاتمه یابد.

➢ دیاگرام‌های سه‌تایی حد واسط بدون نقطه واکنشی:



- دیواره حد واسط مثلث را به دو مثلث مساوی تقسیم می‌کند.
- هر مثلث دارای نقطه کوتکتیک جداگانه‌ای است.
- نحوه ذوب X (نقطه نهایی X):
  - شروع ذوب E که هر سه سازند شروع به ذوب می‌کنند و تمام Ab و مقداری از Fa,Ne ذوب می‌شوند و در ادامه ذوب در مسیر Fa, Ne, Ex' به ذوب ادامه می‌دهند تا در x' تمام Ne ذوب می‌شود و در ادامه Fa در مسیر xx' ذوب شده تا در X همه آن ذوب گردد.
- نحوه تبلور y: نقطه نهایی E'
  - در y تبلور SiO_2 و Fa نیز متبلور شده و در ادامه در مسیر $SiO_2, Fa, y'E'$ به تبلور خود ادامه می‌دهند تا در نقطه E همزمان با آن‌ها Ab نیز متبلور می‌شود (کوارتز و نفلین را در هیچ ماگمایی با هم نداریم)

➢ دیاگرام‌های سه‌تایی حد واسط با نقطه واکنشی:



- دیواره مثلث را به دو مثلث نامساوی تقسیم می‌کند.
- در این دیاگرام‌ها نقطه واکنشی P یا R وجود دارد.
- دارای منحنی واکنشی Ap است.
- اگر ترکیب مورد نظر در مثلث $(An-Fo-En)$ باشد و یا بر روی دیواره حد واسط قرار گیرد، نقطه نهایی تبلور و یا شروع ذوب همان نقطه واکنشی R یا P است.
- تبلور B: (نقطه نهایی تبلور P یا R)
  - در مسیر BB' فقط Fo متبلور می‌شود تا در B، آنورتیت نیز شروع به تبلور می‌کند در ادامه مسیر $Fo, An, B'P$ متبلور می‌شود تا اینکه در نقطه P (واکنشی) مقداری از بلورهای Fo با مایع SiO_2 واکنش داده و به انستاتیت تبدیل می‌شود و همزمان با آن مابقی Fo و An نیز کاملاً متبلور می‌گردند و ما در P یا R: Fo,An ,En را خواهیم داشت.
- تبلور C: (نقطه نهایی تبلور P)
  - به دلیل آنکه نقطه C' درروی منحنی واکنشی است عمل تبدیل Fo به En برخلاف ترکیب B در مسیر تبدیل Fo به En صورت می‌گیرد و از Fo کمی به En تبدیل می‌شود تا در نقطه P عمل تبدیل Fo به En خاتمه می‌یابد، پس در P (An, Fo,En) را داریم.
  - نکته: در ترکیب B عمل تبدیل Fo به En در یک حرارت ثابت (نقطه P) صورت می‌گیرد درحالی‌که در ترکیب C در یک مسیر واکنشی با حرارت متغیر $(C'P)$ صورت می‌گیرد.

- تبلور D (نقطه نهایی تبلور E)
- عمل تبلور در مسیر $D'P$ صورت می گیرد. برخلاف ترکیب C در مسیر $D'P$ تمام Fo با SiO_2 واکنش می‌دهد تا به En تبدیل گردد تا در نقطه P عمل واکنش تمام‌شده و همه Fo به En تبدیل شود، پس در مسیر En, An, PE متبلور شده تا در SiO_2, E نیز با آن‌ها متبلور می‌شود و در انتها داریم (SiO_2, An, En).
- تبلور F (نقطه نهایی تبلور E)
- در مسیر FF' فقط SiO_2 متبلور می‌شود تا در F' همزمان، An متبلور می‌شود و در ادامه $SiO_2, An, F'E$ به تبلور خود ادامه می‌دهند تا در En,E نیز متبلور می‌شود و در انتها) SiO_2, An, En داریم.
- تبلور Z (نقطه نهایی P)
- در مسیر ZT فقط An متبلور می‌شود تا در T همزمان با Fo,An نیز متبلور می‌شود TP (Fo,An) متبلور تا اینکه در نقطه واکنشی P تمام Fo در واکنش با SiO_2 به En تبدیل می‌شود و درنهایت En، An در نقطه P متبلور می‌شود.

نگاهی کلی به قانون فازها:

سیستم یک تشکیل‌دهنده: $V+P=C+2 \rightarrow (T,P) \rightarrow (\downarrow V, P\uparrow)$

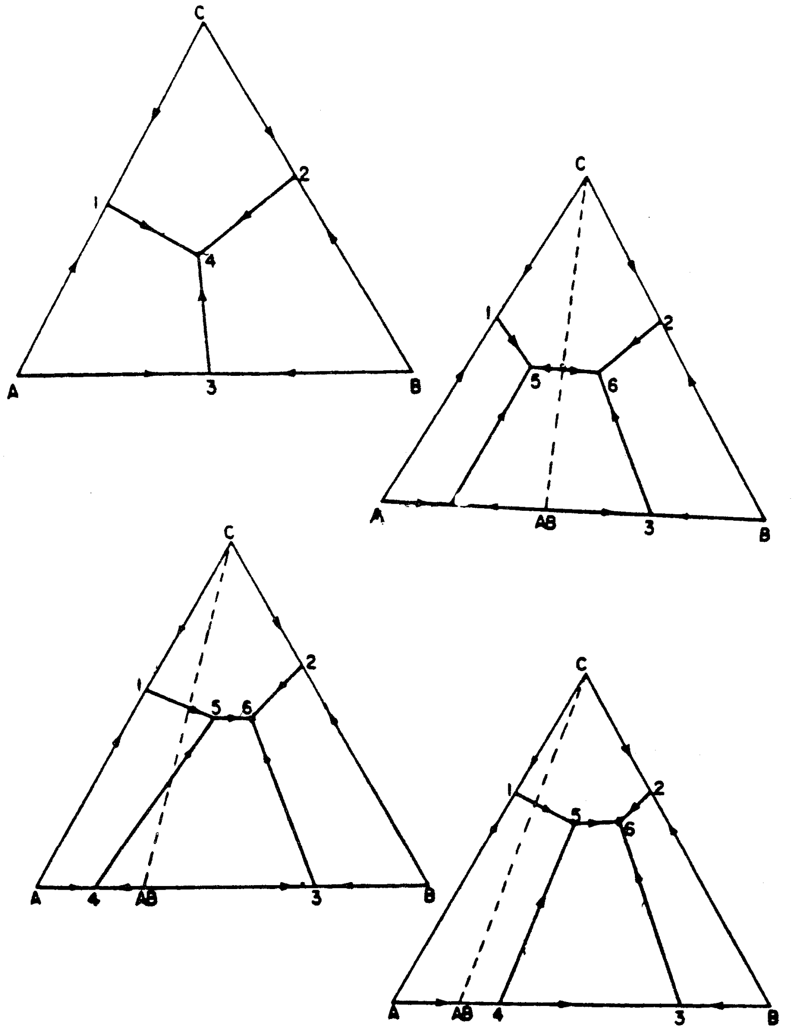
سیستم دو تشکیل‌دهنده: $V+P=C+1 \rightarrow T \rightarrow (\downarrow V, P\uparrow)$

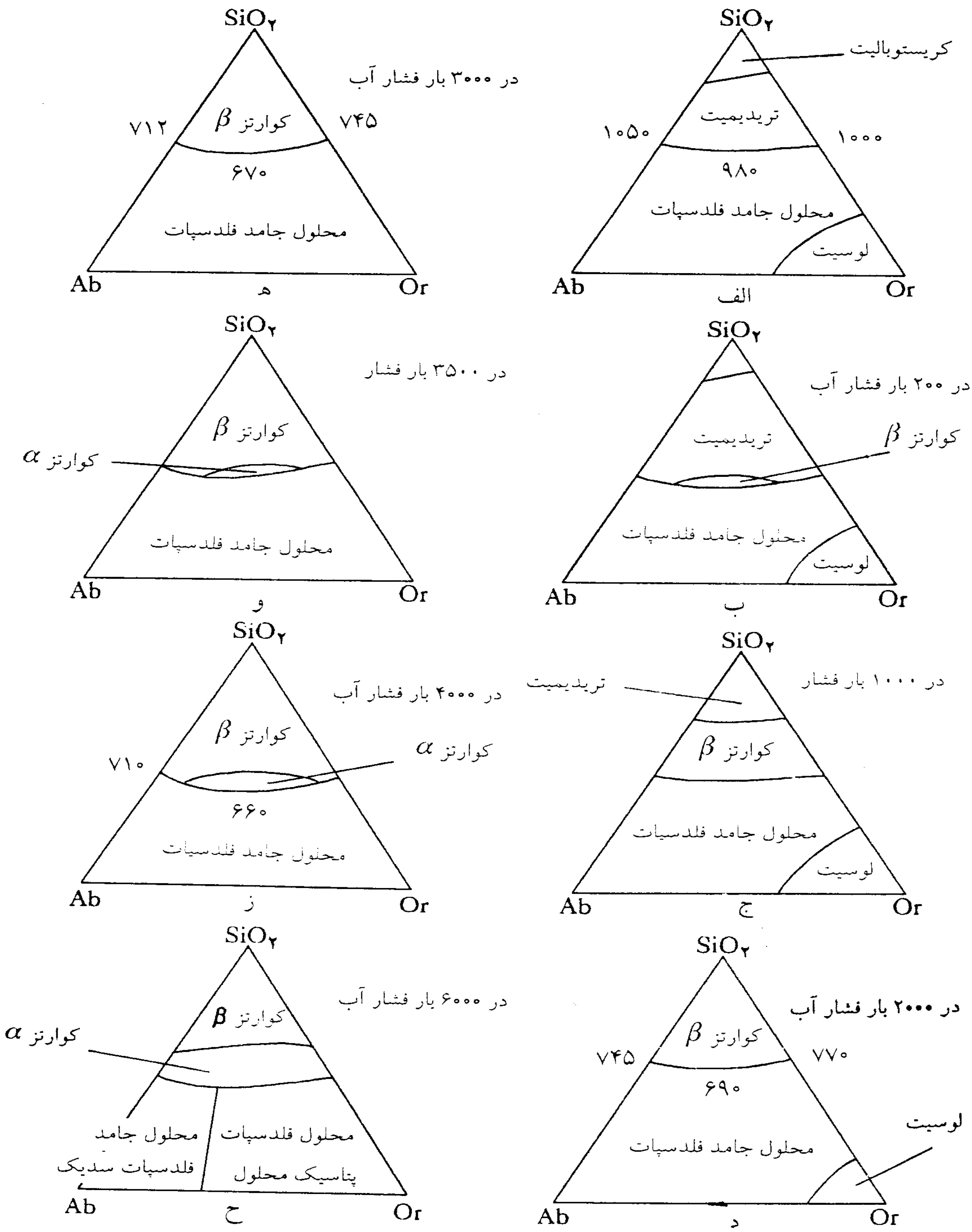
سیستم سه تشکیل‌دهنده: $V+P=C+1 \rightarrow T \rightarrow (\downarrow V, P\uparrow)$

سیستم دوتایی ← E نقطه اتکتیک یا یوتکتیک

سیستم‌های سه‌تایی ← E نقطه اتکتیک سه‌تایی یا کوتکتیک

➢ **تصاویری از چهار حالت کلاسیک از سیستم سه‌تایی با نقطه اتکتیک سه‌تایی:**




SiO_2
کریستوبالیت
تریدیمیت
۱۰۵۰
۱۰۰۰
۹۸۰
محلول جامد فلدسپات
لوسیت
Ab
Or
الف
SiO_2
در ۲۰۰ بار فشار آب
تریدیمیت
کوارتز β
محلول جامد فلدسپات
لوسیت
Ab
Or
ب
SiO_2
در ۱۰۰۰ بار فشار
تریدیمیت
کوارتز β
محلول جامد فلدسپات
لوسیت
Ab
Or
ج
SiO_2
در ۲۰۰۰ بار فشار آب
کوارتز β
۷۴۵
۷۷۰
۶۹۰
محلول جامد فلدسپات
لوسیت
Ab
Or
د
SiO_2
در ۳۰۰۰ بار فشار آب
کوارتز β
۷۱۲
۷۴۵
۶۷۰
محلول جامد فلدسپات
Ab
Or
هـ
SiO_2
در ۳۵۰۰ بار فشار
کوارتز β
کوارتز α
محلول جامد فلدسپات
Ab
Or
و
SiO_2
در ۴۰۰۰ بار فشار آب
کوارتز β
کوارتز α
۷۱۰
۶۶۰
محلول جامد فلدسپات
Ab
Or
ز
SiO_2
در ۶۰۰۰ بار فشار آب
کوارتز β
کوارتز α
محلول جامد فلدسپات سدیک
محلول فلدسپات پتاسیک محلول
Ab
Or
ح

❀ سیستم‌های ٤ تائی:

- به‌صورت تترائدرهای ۴ وجهی هستند که از ۴ ترکیب مختلف تشکیل شده اند و در هر رأس یک ترکیب قرار می‌گیرد.
- فشار ثابت فقط دما متغیر F = C – P + 1
- مثال:

سیستم کوارتز، آلبیت، آنورتیت، ارتوز (سیستم گرانیتی)

سیستم آلبیت، آنورتیت، دیوپسید، فروسیلیت ($FeSiO_3$) یا سیستم بازالتی

- تأثیر آب در ذوب و تبلور ماگما (فشار بخار آب یا فشار مرطوب):

افزایش فشار بخار آب باعث کاهش دمای ذوب و تبلور کانی‌ها و سنگ‌ها می‌شود.
افزایش فشار خشک باعث افزایش دمای ذوب و تبلور کانی‌ها و سنگ‌ها می‌شود. ارتوز:
در فشار خشک تا ۱۹/۵ کیلوبار ذوب ناسازگار صورت می‌گیرد ولی در حالت فشار مرطوب ذوب ناسازگار به ۲/۵ کیلوبار می‌رسد.

- انستاتیت:

در این مورد عکس حالت قبلی است. در فشار خشک تا ۹ کیلوبار انستاتیت به فورستریت و مایع غنی از سیلیس تبدیل می‌شود اما در فشار مرطوب تا ۲۰ کیلوبار ذوب و تبلور انستاتیت به‌صورت ناسازگار است.

- در زون فرورانش آب آزاد شده از سیلیکاتهی آبدار، نقطه ذوب سنگ‌ها را در عمق ۸۰ تا ۱۰۰ کیلومتری کاهش داده و ذوب اتفاق افتاده و مایع غنی از سیلیس تولید می‌شود. (بازالت تولئیتی)

- عمل دیگر آب تغییر در پاراژنزها و ایجاد کانی‌های جدید است؛ مثلاً دو ماگما را با ترکیب گرانودیوریتی در نظر می‌گیریم که یکی در سیستم خشک و دیگری در سیستم آبدار است. گرانودیوریت محیط خشک شامل کوارتز، پلاژیوکلاز و پتاسیم فلدسپار است؛ اما گرانودیوریت در محیط آبدار غیر از موارد فوق دارای هورنبلند و بیوتیت هم هست.

- تأثیر آب روی سیستم آلبیت ـ ارتوز ـ کوارتز:

افزایش بخار آب باعث، حذف لوسیت ـ تشکیل پلی مورفهای پایدار کوارتز ـ محدود شدن تبلور و ذوب لوسیت ـ افزایش محدوده تبلور کوارتز ـ کاهش دمای ذوب و تبلور تغییر

ترکیب نقطه مینیمم به سمت آلبیت و در فشار 5 kb تبلور همزمان دو نوع آلکالی فلدسپار را باعث می‌شود.

- تأثیر آب در افزایش ضریب انفجار:

در ضمن حرکت ماگما به سطح زمین و با کاهش فشار بخار آب و دیگر گازها به‌طرف بخش‌های فوقانی حرکت می‌کند. غلظت ماگما نقش مهمی در آزادسازی گازها دارد. اگر غلظت کم باشد بخار آب و دیگر گازها از شکستگی‌ها و گسل‌ها و دیگر ساختارها خارج می‌شوند و انفجار رخ نمی‌دهد ولی اگر غلظت زیاد باشد گازها به‌آسانی ماگما را ترک نکرده و باعث انفجار و ایجاد سنگ‌های پیروکلاستیک می‌شوند. (پیروکلاستیک = آذرآواری)

همچنین وجود آب در ماگما می‌تواند باعث ایجاد کانسارهای مهمی از قبیل:
مس پورفیری ـ قلع پورفیری ـ مولیبدن پورفیری ـ تنگستن پورفیری و... شود.

بنابراین تأثیر وجود آب در ماگما به‌طورکلی به شرح زیر است:

۱) تبلور سیلیکات‌های آبدار
۲) کاهش دمای شروع تبلور
۳) افزایش دامنه تبلور (فرصت سرد شدن و افزایش اندازه بلورها)
۴) ایجاد تغییر در پاراژنز
۵) تغییر در تبلور عادی یا غیرعادی سیلیکات‌ها
۶) تشکیل زونینگ در پلاژیوکلازها
۷) انفجار و ایجاد سنگ‌های پیروکلاستیک
۸) آلتره شدن سنگ‌ها و ایجاد زون‌های آلتراسیون
۹) امکان تشکیل ذخایر ماگمایی... پورفیری

- نام‌گذاری و تعیین سری سنگ‌های آذرین: (فاکتورهای دسته‌بندی سنگ‌های آذرین)
- بافت ـ اندازه دانه‌ها ـ رنگ ـ ترکیب کانی‌شناسی (مُدال) ـ نحوه تشکیل ـ منشأ و ترکیب شیمیایی (نورم یا تجزیه شیمیایی سنگ)

- بر اساس محیط تشکیل سنگ‌ها را به درونی، بیرونی و نیمه عمیق تقسیم می‌کنیم.

درونی (۱ تا ۵ میلی‌متر و در پگماتیت‌ها بیشتر از ۵ میلی‌متر)
نیمه عمیق (۰/۵ تا ۱ میلی‌متر)

بیرونی (کمتر از ۰/۵ میلی‌متر)

بر اساس درصد کانی‌های تیره (ضریب m) مثل پیروکسن ـ میکا و آمفیبول
اگر m کمتر از ۹۰ درصد باشد برای نام‌گذاری و طبقه‌بندی از مثلث F A P Q استفاده می‌شود.
اگر m بیشتر از ۹۰ درصد باشد سنگ را مافیک یا اولترامافیک می‌نامند و برای نام‌گذاری از مثلث‌هایی مثل: cpx ـ ol ـ opx استفاده می‌شود.

- نام چند کانی و سنگ مهم:

شارنوکیت (چارنوکیت) شامل هیپرستن و فلدسپاتهای پرتیتی

فوئیدمونزوسینیت (پلاژیوسینیت)
فوئیدمونزودیوریت و فوئیدمونزوگابرو (اِسِکْسیت)
فوئید دیوریت و فوئید گابرو (نوع نفلین دار آن را تراکیت گویند و نوع آنالسیم دار آن را تِشِنیت گویند)

پیکریت: شامل الیوین، پیروکسن همراه با آمفیبول و بیوتیت

کربناتیت‌ها: سنگ‌های درونی یا بیرونی‌اند که بیش از ۵۰ درصد کربنات دارند.
فروکربناتیت: یعنی کربناتیت سرشار از آهن
ناترو کربناتیت: کربنات‌های دارای KوNa
کلسیت کربناتیت:
اگر کلسیت آن دانه‌درشت باشد «سوویت»
اگر کلسیت آن دانه‌ریز باشد «آلویکیت»
اگر دولومیت آن بیشتر از ۹۰ درصد باشد «بی فورستریت»

- **تفسیر دیاگرام‌ها:**

۱. محدوده پایداری لوسیت در شرایط خشک و فشار معمولی برقرار است ولی در شرایط آبدار با افزایش فشار از بین می‌رود.

۲. پلی مورفهای کوارتز (Cri, Tri) در شرایط خشک و فشار معمولی (پلی مورفهای حرارت بالا) پایدار ولی در شرایط آبدار از بین می‌روند و پلی مورفهای حرارت پایین (α,β) جانشین آن‌ها می‌شوند.

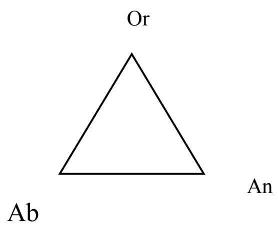
۳. پایداری سانیدین تا حداکثر ۴۰۰۰ بار فشار است و در بیشتر از این مقدار فلدسپات به‌صورت ارتوکلاز یا میکروکلین در سنگ ظاهر می‌شود.

۴. کانی‌های لوسیت و سانیدین (F) در آذرین خروجی به علت فشار بخار آب کم پایداراست.

۵. در شرایط فشار بالا، شرایط تشکیل پرتیت و آنتی پرتیت در یک سنگ آذرین درونی فراهم می‌شود، یعنی:

پرتیت معادل ← سانیدین حرارت پایین

آنتی پرتیت معادل ← آنورتوز حرارت پایین



- نکات:

- سیستم گرانیتی: کوارتز – ارتوز – آلبیت – آنورتیت
- سیستم بازالتی یا گابرویی: آلبیت – آنورتیت – دیوپسید – فروسیلیت
- ترکیب گوشته فوقانی: Cpx + Opx + Olv + یک کانی آلومینیوم‌دار
- سیستم ترکیب سنگ‌های پوسته قاره‌ای: سیلیس – آلبیت – ارتوکلاز (سیستم باقیمانده)
- سیستم آلبیت – آنورتیت – دیوپسید: فاقد اتکتیک ۳ تایی و دارای ۲ قلمرو تبلور است
- سیستم‌های چهار تشکیل‌دهنده: (دارای ۶ سیستم دوتایی و ۴ سیستم سه‌تایی)
- استفاده از قانون فازها در دگرگونی: P = C + 2-(R+V)
- R = تعداد واکنش مستقل بین فازها
- در ذوب دیوپسید Cpx به ازای هر ۱ کیلو بار فشار، حرارت ذوب $10^0 C$ اضافه می‌شود.
- نیف یا نیفه هسته زمین است که دارای Fe+ Ni است.
- ترکیب شیمیایی گرانیت‌ها شبیه رسوبات پلیتی است.
- تمام گرانیت‌های پالین ژنتیک از ذوب بخشی رسوبات پلیتی اند.
- اثر **فیلتر پرس**: با ته‌نشین شدن بلورهای، قسمت تحتانی پر شده و ماگما به سمت بخش فوقانی حرکت می‌کند
- توجه داشته باشید که هضم اصولاً پدیده‌ای شیمیایی و نه کاملاً حرارتی است.
- مایعات گرانیتی قادر به ذوب سنگ‌های بازالتی و دیوریتی به علت حرارت ذوب بالاتر نیستند.

- عدم کاربرد سری باون شامل: (۱) در فشار بالا Opx قبل از Olv؛ (۲) سری آگپائیتی؛ (۳) مشاهده فایالیت Fa با کوارتز Qtz.
- پیروژنیک: مواد فرارشان کم است
- هید اتوژنیک: شامل مواد فرار است
- الیوین در طبیعت به‌صورت محلول جامد فورستریت – فایالیت است.
- پلاژیوکلاز در طبیعت به‌صورت محلول جامد آلبیت – آنورتیت است.
- F (k): حرارت بالا تبدیل به ← Luc
- F(k) در فشار آب تبدیل به ← F(k)
- منحنی‌های تبلور جزءبه‌جزء: بلورهای جامد پس از تشکیل به‌خوبی از سیستم خارج می‌شود.
- تعادلی: مایع با بلور در تعادل‌اند و پیوسته با هم واکنش دارند.
- استثناء: سیستم پسدوولاستونیت – آکرمانیت – ژلنیت، نه تبلور جزئی و نه تبلور تعادلی دارد، بلکه حد واسط است.
- می‌توان منحنی‌های تعادل را به‌طور مستقیم از منحنی‌های جزءبه‌جزء ترسیم کرد.
- ذوب جزءبه‌جزء کامل بر عکس تبلور جزءبه‌جزء کامل نیست.
- از تبلور جزءبه‌جزء مایعاتی به وجود می‌آید که ترکیب آن‌ها نسبت به تبلور بخشی، تبلور متعادل و ذوب متعادل محدودتر است.
- سیستم سه‌تایی با ذوب جور: ۲ سیستم سه‌تایی + ۵ سیستم دوتایی.
- وجود اسپینل در هر سیستم نشانه کاذب بودن آن است.

➢ توجه:

(۱) سیستم گرانیتی

(۲) سیستم بازالتی – گابرویی: $An \leftrightarrow Ab + (Px)Di +$ فروسیلیت

(۳) سیستم باقیمانده: Si + An / Or

(۴) سیستم فاقد E سه‌تایی: $_{An} \leftrightarrow _{Ab} + (Cpx)Di$

مقیاس حرارتی فون کوبل (بر اساس افزایش دمای ذوب):

استی بین ← کالکوپیریت ← گرونا ← آکتینوت ← ارتوز ← پیروکسن ← کوارتز

در سیستم کندانسه V<3 است، چنانچه V= 2 ← P = C

مایع حاصل از ذوب پریدوتیت:

فشار بالا: آلکالن، فشار متوسط: کالک آلکالن، فشار پایین: تولئیتی

نمودار $\frac{Na_2O+K_2O}{SiO_2}$ یا نمودار $\frac{Alc}{SiO_2}$



- آلبیت، ارتوز و الیوین (به علت Si بالا) را در ACF نمی‌توان نمایش داد
- (بیگانه سنگ: زینولیت)، (بیگانه کانی یا بلور: زینوکریست)
- اثبات هضم با $\frac{Sr^{87}}{Sr^{86}}$ و گوگرد و اکسیژن
- پدیده ترامپ: مشاهده اسکلت کانی‌های سنگ و یا سوزن‌های بعضی از کانی‌ها در حاشیه آنکلاو.
- Px و Plg مهم‌ترین کانی‌های حساس به تغییرات شیمیایی می‌باشند.
- کانی‌های تیپومورف: کانی‌های که کاملاً فرآیند تشکیل خود را مشخص می‌نمایند (مثلاً پولوسیت تن‌ها در پگماتیت و در آخرین مراحل رشد می‌کند).

مراحل تبلور ماگما:

- ✓ مرحله ارتو ماگمایی ← پیروژنتیک (تشکیل همه کانی‌های سیلیکاته)
- ✓ مرحله پگماتیتی
- ✓ مرحله پنوماتولیتی ← کانی سازی
- ✓ مرحله هیدروترمالی ← کانی سازی

توجه:

- آلبیت تجزیه (ذوب) ← نفلین + کوارتز
- پتاسیم فلدسپات شرایط خشک ← Luc +F(k) (ذوب ناجور)
- پتاسیم فلدسپات شرایط مرطوب ← F (k) (ذوب جور)
- انستاتیت خشک ← انستاتیت + Fo (ذوب ناجور)
- انستاتیت فشار بخار ← انستاتیت (ذوب جور)

- ارتوکلاز (ذوب) ← SiO_2 + Luc
- آندالوزیت (ذوب) ← مولیت + SiO_2
- نفلین + کوارتز ← ژادئیت (فشار بالا Px)
- نفلین + آلبیت ← ژادئیت (فشار بالا Px)

دیاگرام‌های دوتایی:

- ✓ حد واسط بدون نقطه واکنشی: ذوب جور
- ✓ حد واسط با نقطه واکنشی P یا R: ذوب ناجور
- ✓ سنگ‌های طبیعی دامنه ذوب دارند، نه نقطه ذوب چون نقطه ذوب سنگ از کانی‌ها خیلی کمتر است
- ✓ میدان پایداری کانی‌های دارای وزن مخصوص کم با افزایش فشار کاهش می‌یابد و از بین می‌رود (کلاً حلالیت آب با دما رابطه عکس دارد).
- ✓ ذوب تعادلی بر عکس تبلور تعادلی است، اما ذوب بخشی بر عکس تبلور بخشی نیست.

توجه:

- ✓ بر اساس کاهش فشار:

اکلوژیت > گرانولیت گارنت دار> بازالت

گارنت لرزولیت > اسپینل لرزولیت > پلاژیوکلازلرزولیت

پریدوتیت گارنت دار > اسپینل دار > پلاژیوکلازدار

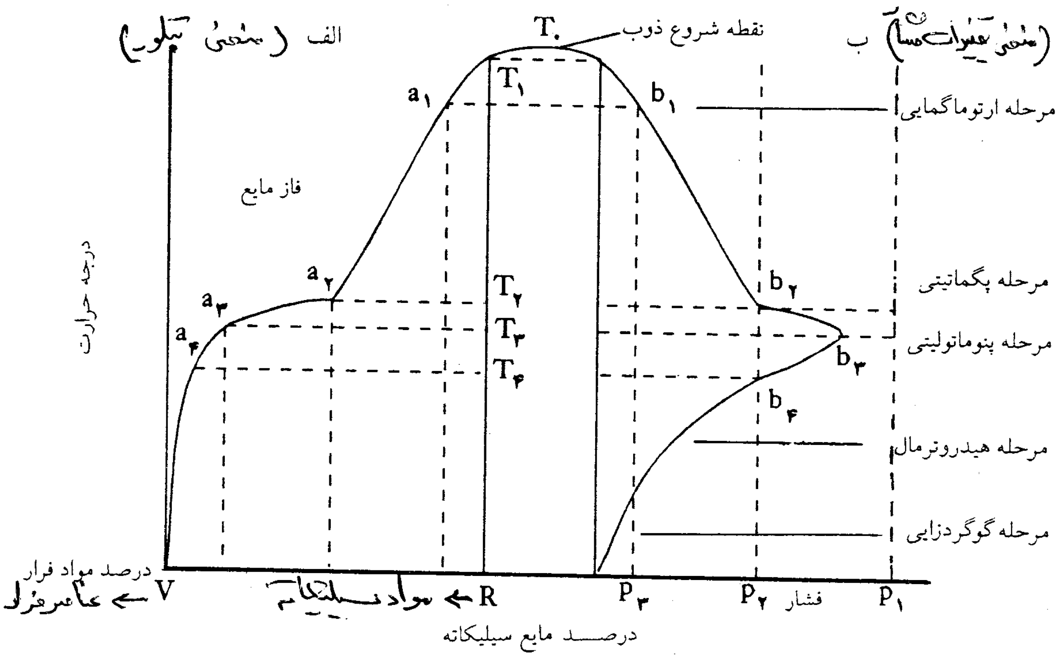
نکته:

- ✓ عامل اصلی تنوع بازالت‌ها، فشار است.
- ✓ نکته: تغییرات عناصر سازگار مانند، Ni, Mg, Fe تن‌ها معیار برای اندازه‌گیری تفریق یا نرخ ذوب بخشی به‌حساب می‌آیند.

توجه:

- ✓ آبساروکیت: بازالت شوشونیتی
- ✓ لاتیت: داسیت شوشونیتی
- ✓ باناکیت: آندزیت شوشونیتی

❁ مراحل مختلف تبلور یک مایع مذاب سیلیکاته:



❁ مراحل تکامل ماگما با توجه به دیاگرام:

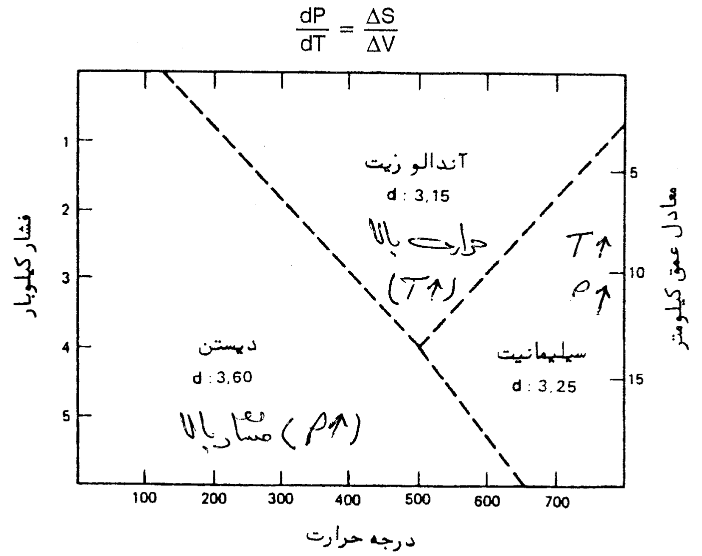
۱- مرحله ارتوماگمایی: که در این مرحله سنگ‌های سیلیکاته تشکیل می‌شوند.

۲- مرحله پگماتیتی: که کانی‌هایی از مایع باقیمانده سیلیکاته در حضور مواد فرار متبلور می‌شوند.

۳- مرحله پنوماتولیت: که در آن عناصر فرار نقش مهمی به عهده دارند و بیش از ۵۰٪ ماده باقیمانده را تشکیل می‌دهند.

۴- مرحله هیدروترمال: که در آن محلول‌های آبکی وجود دارد و تن‌ها موادی که قابلیت انحلال زیاد داشته باشند در آن به حالت محلول یافت می‌شوند.

❁ قلمرو پایداری کانی‌های ($Al_2Si_2O_5$):



❖ تفریق در پلاژیوکلازها:

بلورهای متبلور شده در آشیانه ماگمایی به صورت شناور باقی نمی‌مانند و رسوب می‌کنند درنتیجه ارتباط آن با ماگما قطع می‌شود.

ماگمایی با حجم نسبتاً زیاد حاوی ۸۰ درصد آنورتیت و ۲۰ درصد آلبیت را در نظر می‌گیریم. در حالتی که سیستم آهسته سرد شود پلاژیوکلازهایی که متبلور می‌شوند لحظه‌به‌لحظه با مایعی که در آن شناورند واکنش می‌دهند در دمای Ta اندازه و وزن پلاژیوکلازها به حدی است که دیگر به صورت شناور باقی نمی‌مانند پس در اتاقک ماگمایی رسوب‌کرده و تماس آن با ماگما قطع می‌شود. پس در دمای Ta مایع جدید La شروع به تبلور خواهد کرد.

(فرض بر این است که در دمای Tb مجدداً پلاژیوکلازها رسوب می‌کنند)

پس مایع باقی‌مانده بانام Lb شروع به تبلور خواهد کرد. تکرار این عمل باعث تفریق در پلاژیوکلازها شده و از یک ماگمای اولترامافیک پلاژیوکلازهایی با ترکیب مختلف تولید می‌شود. (کمپلکس بوشولد در آفریقای جنوبی و استیل واتر آمریکا) با تفریق پلاژیوکلاز دمای مایع و ترکیب نهایی عوض می‌شود.

❖ زونینگ (منطقه بندی) در پلاژیوکلازها:

عوامل مؤثر در ایجاد زونینگ:

۱) کاهش سریع و لحظه‌ای دمای ماگما

۲) افت فشار بخار آب (فشار خشک با دمای ذوب و تبلور نسبت مستقیم دارد ولی فشار مرطوب رابطه عکس دارد. در واقع کاهش فشار بخار آب باعث افزایش دما و تغییر ماگما می‌شود)

۳) اختلاط با ماگمای جدید

۴) تغییر در غلظت ماگما (تغییر مقدار SiO_2 باعث تغییر در ترکیب ما می‌شود)

۵) وجود قطعاتی از سنگ دیواره در ماگما

✓ در پلاژیوکلازها تغییر مقدار آلبیت و آنورتیت از مرکز به سمت حاشیه و یا از داخل به خارج باعث ایجاد این فرم می‌شود.

- ✓ اگر از مرکز به سمت حاشیه مقدار آلبیت افزایش یابد زونینگ نرمال و برعکس آن زونینگ معکوس است.

❖ بررسی نمودار زونینگ:

در فشار ۰/۵ کیلو بار و شرایط نیمه عمیق ماگما در حال سرد شدن است. پس از مذاب X در دمای T1 پلاژیوکلاز P1 تشکیل و در دمای T2 پلاژیوکلاز P2 تشکیل می‌شود. حال اگر در دمای T2 انفجار رخ دهد فشار بخار آب کاهش می‌یابد پس دمای منحنی افزایش پیدا می‌کند.

در فشار ۰/۱ کیلوبار P3 روی P2 تشکیل می‌شود و ایجاد زونینگ می‌کند.

در یک منطقه آتش‌فشانی اگر مطمئن باشیم که زونینگ بر اثر فوران ایجاد شده می‌توانیم مراحل انفجار را هم محاسبه کنیم.

درصورتی‌که مجدداً فشار بخار آب کمی افزایش یابد و دمای سیستم کاهش یابد قسمتی از پلاژیوکلاز قبلی ذوب شده و پلاژیوکلاز جدید روی آن تشکیل می‌شود. درصورتی‌که تغییرات در چند مرحله انجام شود، می‌توان زونینگ مراحل انفجار را بررسی و تعداد آن را تعیین کرد.

❖ پالئو مغناطیس:

از مغناطیس دیرین که از گذشته تا امروز در سنگ‌ها حفظ شده می‌توان به جهت میدان مغناطیس در گذشته پی ببریم. کانی‌هایی که خاصیت مغناطیسی دارند در ماگما در راستای میدان مغناطیس زمین قرار می‌گیرند.

کانی‌ها را بر اساس خاصیت مغناطیسی به ۵ دسته تقسیم می‌کنند:

۱) دیا مغناطیس
۲) پارا مغناطیس
۳) فرو مغناطیس
۴) فری مغناطیس
۵) آنتی فرو مغناطیس

چرخش الکترون با بار − به دور هسته با بار + ایجاد میدان مغناطیس می‌کند که به آن چرخش اوربیتالی می‌گویند. به دلیل حرکت الکترون‌ها در مدارها در جهات مختلف مقدار مغناطیس تولید شده بسیار ناچیز است.
در حالت عادی این اجسام خاصیت مغناطیس ندارند. اجسامی که خاصیت مغناطیس ندارند فقط وقتی در یک میدان قرار گیرند این خاصیت در آن‌ها ظاهر می‌شود که به آن‌ها دیا مغناطیس می‌گویند.

دیا مغناطیس:

خاصیت مغناطیس ضعیف دارند چون جهت مغناطیس تولید شده در جسم مخالف با جهت میدان دیا مغناطیس است. مثل نمک، کوارتز، مس...

پارا مغناطیس:

در این اجسام الکترون‌ها غیر از چرخش به دور هسته به دور خودشان هم می‌چرخند و در نتیجه میدان مغناطیس تولید شده افزایش می‌یابد.
این نوع مغناطیس در اجسام به خودی خود وجود ندارد و هنگامی که جسم در میدان مغناطیس قرار گیرد ظاهر می‌شود. فرق این نوع مغناطیس با دیا مغناطیس در این است که مغناطیس تولید شده با میدان هم‌جهت است. به این میدان‌های مغناطیسی اسپین می‌گویند.
مثل پیروکسن، بیوتیت، گارنت، روتیل و ایلمنیت...
اسپین: به حرکت الکترون به دور خودش حرکت اسپین می‌گویند.
به موادی که در حالت عادی خاصیت مغناطیسی دارند فرو مغناطیس گویند. این خاصیت مربوط به آرایش در خانه الکترونی است. بر این اساس مواد به ۳ گروه فرو مغناطیس، فری مغناطیس و آنتی فری مغناطیس تقسیم می‌شوند.

فرو مغناطیس:

اسپین‌ها هم‌اندازه و هم‌جهت هستند و میدان‌های تولید شده نیز هم‌اندازه و هم‌جهت هستند.

فری مغناطیس: غیر هم‌اندازه و غیر هم‌جهت

آنتی فرو مغناطیس: هم‌اندازه و غیر هم‌جهت

- پس اجسامی که خاصیت مغناطیسی دائم دارند، اگر در یک میدان مغناطیسی قرار گیرند خاصیت مغناطیس آن‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش شدت میدان تا یک حد خاص خاصیت مغناطیسی اضافه می‌شود و از آن به بعد افزایش شدت میدان تأثیری بر مغناطیس جسم ندارد. در این حالت جسم اشباع شده است که به آن اشباع مغناطیسی گویند.
- برای حذف خاصیت مغناطیس باقی‌مانده باید یک نیروی مغناطیسی در خلاف جهت استفاده شود که به آن نیروی کورسیو گفته می‌شود. نیروی کورسیو به شکل اندازه، ترکیب شیمیایی و دما بستگی دارد مثلاً برای یک کانی سوزنی شکل نیروی کورسیو بیشتری نیاز داریم تا یک کانی مکعبی.
- هرقدر ذرات کوچک‌تر باشند نیروی کورسیو بیشتری نیاز داریم که مغناطیس آن‌ها خنثی شود.

کانی‌های مهم مغناطیسی:

- **مگنتیت** (Fe_3O_4): خاصیت فری مغناطیس دارد. در هر واحد از شبکه مگنتیت ۲۴ اتم آهن وجود دارد. از این ۲۴ اتم، ۸ عدد را در گروه A که اسپین آن‌ها با هم هم جهت است می‌گذاریم و ۱۶ عدد دیگر را در گروه B که اسپینهای آن‌ها به‌موازات هم است قرار می‌دهیم. ۸ اتم گروه A با ۸ اتم از گروه B خنثی می‌شوند و ۸ اتم باقی‌مانده در مگنتیت ایجاد خاصیت مغناطیس می‌کنند. دما کوری مگنتیت 580°C است.

- **اواواسپینل** (Fe_2TiO_4): خاصیت آنتی فرو مغناطیس دارد و در سنگ‌های آتش‌فشانی که مگنتیت آن‌ها غنی از تیتانیوم باشد دیده می‌شود. دمای کوری آن پایین است: -153°C

- **هماتیت** (Fe_2O_3): خاصیت آنتی فرو مغناطیس دارد. خاصیت مغناطیس آن ضعیف ولی دائمی و پایدار است. دمای کوری آن 680°C است.

- **ایلمنیت** ($FeTiO_3$): در دمای عادی خاصیت مغناطیس ندارد ولی در -216°C آنتی فرو مغناطیس است. پس دمای کوری آن دمای محیط است. در سنگ‌های آتش‌فشانی غنی از تیتانیوم دیده می‌شود.

- **مگهمیت** (Fe_2O_3): یک نوع مگنتیت اکسید شده است که تعداد اتم‌های آهن در شبکه پایین است. در دمای 300°C به هماتیت تبدیل می‌شود. دمای کوری آن متغیر است. در گدازه‌های آتش‌فشانی در دمای 545°C تا 675°C تولید می‌شود. در محیط‌های رسوبی در دمای پایین و محیط مرطوب، مگنتیت به مگهمیت تبدیل می‌شود. در ساخت نوارهای مغناطیس (صوتی تصویری) از این کانی استفاده می‌شود.

- **پیروتیت** (FeS): تن‌ها سولفیدی است که خاصیت مغناطیسی دارد. مغناطیس آن از نـوع فـری مغنـاطیس اسـت. دمـای کوری آن 320°C است.

❖ بر اساس مغناطیس باقی‌مانده در سنگ‌ها ۳ نوع پالئو مغناطیس وجود دارد:

TRM (مغناطیس باقی‌مانده حرارتی Termal Remant Meghnatic):

در سنگ‌های آذرین کانی‌هایی که خاصیت مغناطیس دارند در هنگام سرد شدن در جهت میـدان مغنـاطیس زمـان قرار می‌گیرند؛ بنابراین بعد از سرد شدن و تبلور جهت میدان مغناطیس زمان در آن‌ها ثبت شده است.

DRM (مغناطیس باقی‌مانده ته‌نشینی Deposition Rement Meghnatic):

در سنگ‌های رسوبی کانی‌هایی که خاصیت مغناطیسی دارند و بـه صـورت آواری حمـل مـی‌شـوند در محـیط در جهت میدان مغناطیسی ته‌نشین و سخت می‌شوند.

CRM (مغناطیس باقی‌مانده شیمیایی Chemical Rement Meghnatic):

شامل کانی‌هایی می‌شود که در زمان اکسیداسیون و دیگر فرایندهای شیمیایی مغناطیس را در خود حفظ کرده‌اند.

✓ عواملی که در خاصیت مغناطیس سنگ اثر می‌گذارند:

۱) شکل ذرات: ذراتی با ابعاد و اندازه‌های یکسان مغناطیس پایداری ندارند امـا بلورهـای کشـیده و پایـداری بیشـتری دارند.

۲) اندازه ذرات: نیروی کورسیو با اندازه ذرات نسـبت عکـس دارد. پایـداری مغناطیسـی بـا کـاهش انـدازه ذرات بـالا می‌رود.

۳) مقدار اکسید تیتانیوم (TiO_2): افزایش این اکسید باعـث افـزایش ابعـاد شـبکه‌هـا مـی‌شـود. در نتیجـه پایـداری کـم می‌شود و نیروی کورسیو هم کم می‌شود.

۴) جدائی در فاز جامد: باعث کاهش ابعاد بلورهای مغناطیسی می‌شود. پایداری افزایش می‌یابد و نیروی کورسـیو هـم زیاد می‌شود.

نام‌گذاری و تعیین سری سنگ‌های آذرین:

اصطلاحات:

- **هیالوکلاست:** قطعات شیشه آبدار برشی (زاویه‌دار) که در هنگام ورود ماگما به محیط مرطوب و یا دریا ایجاد شده است.

- **اپی کلاست:** قطعات سنگ‌های آتش‌فشانی که در اثر هوازدگی و فرسایش حمل شده و رسوب‌گذاری بر روی آن‌ها انجام شده است.

- **فیام:** اشکال شعله مانند در قطعات پومیس که در پیروکلاستیک‌های جوش‌خورده دیده می‌شود.

- **لاهار:** در اثر ذوب برف و یخ همزمان یا قبل از فعالیت آتش‌فشان تشکیل می‌شوند.

- **پپریت:** سنگ‌های رسوبی دانه‌ریز که در آن قطعات بزرگ آتش‌فشانی دیده می‌شود.

- **پرلیت:** شیشه‌های طبیعی آبدار که در محیط مرطوب تشکیل می‌شوند.

- **پومیس (پامیس):** قطعات شیشه‌ای یا متبلور که قسمت اعظم آن فضاهای خالی است. وزن مخصوص آن‌ها کم بوده و از گدازه‌های اسیدی تا حد واسط و غنی از گاز تولید می‌شوند.

- **پالاگونیت:** شیشه آبدار با ترکیب بازالتی که در محیط دریایی تشکیل می‌شود. مثل زون گسترش اقیانوسی که آب در مجاورت ماگما است.

- **پیزولیت:** شکل‌های کروی و تخم‌مرغی با لایه‌بندی که از خاکسترهای آتش‌فشانی تشکیل شده است. وقتی اتمسفر غنی از خاکستر باشد و باران ببارد و محیط برای رسوب‌گذاری آن‌ها فراهم باشد این اشکال به وجود می‌آیند.

- **توفیت:** مجموعه‌ای از قطعات پیروکلاستیک (خاکستر آتش‌فشانی) به همراه قطعات رسوبی که در محیط دریایی ته‌نشین می‌شوند.

فاکتورهای تعیین سری سنگ‌های آذرین:

۱) منشأ
۲) ترکیب کانی‌شناسی
۳) موقعیت تکتونیکی
۴) ترکیب شیمیایی

- **از نظر منشأ و موقعیت تکتونیکی** سنگ‌های آذرین به ۳ سری تقسیم می‌شوند:
  ۱) سـری فوق آلکالن
  ۲) سری آلکالن
  ۳) سری ساب آلکالن

- **از نظر کانی‌شناسی و ترکیب شیمیایی** ابتدا باید سنگ‌های فوق آلکالن را جدا کنیم.
  برای سنگ‌های فوق آلکالن:
  $n\ Na_2O + n\ K_2O > n\ Al_2O_3$
  (مول $Na_2O + K_2O) > n\ Al_2O_3$

✓ امروزه دیگر از واژه غریب و نامأنوس ساب آلکالن استفاده نمی‌شود و آن را به دو سری کالک‌آلکالن و تولئیتی تقسیم می‌کنند.

✓ سری آلکالن را بر اساس درصدهای اکسید سدیم و پتاسیم به دو گروه سدیک و پتاسیک تقسیم می‌کنند.

✓ در سری تولئیتی سنگ‌ها از آهن غنی‌انـد. مثـل بازالـت تـولئیتی، آنـدزیت تـولئیتی، انـواع داسـیت، دیوریـت، ریولیـت، گرانیت‌های آهن‌دار و برخی گا بروها.

✓ در سری کالک‌آلکالن آهن کم و مقدار آلومینیم از سری‌های دیگر بیشتر است. مثل بازالت کالـک‌آلکـالن، آنـدزیت، داسیت، ریولیت، گابرو، منزودیوریت، تونالیت گرانودیوریت و گرانیت

- **ماگماتیسم و تکتونیک صفحه‌ای:**

از دیدگاه تکتونیک صفحه‌ای بر اساس حرکت نسبی صفحات قاره‌ای و اقیانوسی مناطق زیر را می‌توانیم داشته باشیم:

۱) حاشیه‌های مخرب (مرز همگرا)
۲) حاشیه‌های سازنده (مرز واگرا)
۳) نقاط داغ (hot spot)

در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود:

۱) حاشیه‌های مخرب (مرز همگرا):

زون فرورانش حاشیه قاره‌ها Continental Margine Subduction Zone
زون فرورانش جزایر قوسی Iland Arcs Subduction Zone
زون تصادم قاره‌ها Continental Collision Zone

۲) حاشیه‌های سازنده (مرز واگرا)

زون گسترش میان‌اقیانوسی Oceanic Spreading Zone
ریفت‌های درون قاره‌ای Continental Rifting Zone
ریفت‌های پشت جزایر قوسی Back Arc Rifting

نقاط داغ (hot spot):

داخل صفحات قاره‌ای Continental Hot Spot

داخل صفحات اقیانوسی Oceanic Hot Spot

- در زون فرورانش حاشیه قاره‌ها و جزایر قوسی سری تولئیتی کالک‌آلکالن، آلکالن و مجموعه‌ای افیولیتی را داریم
- در زون تصادم قاره‌ها ماگمای اسیدی نوع S (منشأ رسوبی) را داریم.
- در زون گسترش کف اقیانوسی بازالت‌های نوع نرمال (N – MORB) و بازالت‌های نوع (P – MORB) را داریم.
- ریفت‌های درون قاره‌ای شامل سری بازالت آلکالن، ماگمای اسیدی نوع S و I کربونتیت‌ها و کیمبرلیت‌ها می‌شود.
- ریفت‌های پشت جزایر قاره‌ای هم مثل ریفت‌های درون قاره‌ای هستند ولی با تنوع سنگی کمتر
- نقاط داغ در پوسته اقیانوسی شامل بازالت تولئیتی و بازالت آلکالن می‌شود.
- نقاط داغ درون قاره‌ای شبیه به ریفت‌های درون قاره‌ای هستند.

ژنز سنگ‌های آذرین:

- **گرانیت‌ها**: فراوان‌ترین سنگ‌های آذرین در روی پوسته هستند که به صورت باتولیت و در مقیاس کوچکتر به صورت استوک یافت می‌شوند. به‌طورکلی گرانیتوئید یعنی سنگ آذرین درونی با کوارتز بیشتر از ۲۰٪
- گرانیتوئیدها شامل آلکالی گرانیت، گرانیت معمولی، گرانودیوریت، تونالیت، کوارتز دیوریت و کوارتز مونزونیت است.
- اما گرانیت‌های واقعی از انواع سینوگرانیت و مونزوگرانیت هستند.
- گرانیت‌ها بر اساس معیارهای مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند که مهم‌ترین آن‌ها اندیس شاند (A/CNK) است.

$$A = Al_2O_3$$
$$C = CaO$$
$$N = Na_2O$$
$$K = K_2O$$

- بر اساس اندیس شاند گرانیت‌ها را به ۴ گروه تقسیم‌بندی می کنند:

۱) فوق آلومینیم (per alumious granite): در این نوع از گرانیت‌ها نسبت A/CNK بزرگتر از یک است و مقدار کرندم در نورم سنگ از صفر بیشتر است.

۲) ساب آلومینیم (sub aluminous granite): در این نوع گرانیت‌ها نسبت A/CNK برابر با یک است و مقدار کرندم در نورم سنگ برابر با صفر است.

۳) متا آلومینیم (meta aluminous granite): در این نوع گرانیت‌ها نسبت A/CNK کوچکتر از یک است و مقدار کرندم در نورم سنگ برابر با صفر است.

($Na_2O + K_2O < Al_2O_3 < (CaO + Na_2O + K_2O$

۴) فوق آلکالن (per alkaline granite): در این نوع گرانیت‌ها نسبت $Na_2O + K_2O > Al_2O_3$ است و مقدار کرندم در نورم سنگ برابر با صفر است.

- چاپل و وایت گرانیت‌ها را به دو گروه S و I تقسیم کردند:
  S) که منشأ گرانیت‌ها ذوب پوسته قاره‌ای است.
  I) که منشأ گرانیت‌ها تفریق ماگمایی است.

- بر اساس محیط تکتونیکی هم می‌توان گرانیت‌ها را به ۴ دسته تقسیم‌بندی کرد:
  ۱) S
  ۲) I
  ۳) A
  ۴) M

S): در زون تصادم قاره‌ها و با منشأ ذوب بخشی سنگ‌های پوسته قاره‌ای است. ضریب شاند در این نوع از نوع فوق آلومینیم بوده و از نظر ترکیب در محدوده گرانیت هستند. (گرانیت نوع کوهزایی)

I): در زون فرورانش حاشیه قاره‌ها و جزایر قوسی دیده می‌شوند و حاصل تفریق ماگمای کالکوآلکالن یا بازالت‌های جزایر قوسی می‌باشند. از نظر ضریب شاند این نوع گرانیت‌ها از انواع متا آلومینیم هستند. دامنه تغییر ترکیب آن‌ها در محدوده کوارتز مونزونیت، گرانودیوریت و گرانیت است.

A): به آن‌ها گرانیت‌های غیر کوهزایی هم گفته می‌شود. در داخل پوسته قاره‌ای یا ریفت‌های درون قاره‌ای تشکیل می‌شوند و حاصل ذوب بخشی سنگ‌های پوسته قاره‌ای می‌باشند. ماگمای این نوع گرانیت‌ها از نوع بدون آب است. از نظر ضریب شاند از نوع فوق آلکالن هستند.

M): به آن‌ها پلاژیوگرانیت هم گفته می‌شود و همراه با مجموعه‌های افیولیتی دیده می‌شوند. از نظر ضریب شاند از نوع متا آلومینیم است. دامنه ترکیب آن‌ها در محدوده کوارتز دیوریت و تونالیت است.

- پیرس و همکاران گرانیت‌ها را بر اساس عناصر کمیاب مانند روبیدیم (Rb)، ایتریم (Yb)، تانتانیم (Ta)، نیوبیم (Nb) و... تقسیم‌بندی کردند:

۱) گرانیت‌های زون گسترش (ORG)

۲) گرانیت‌های همزمان با تصادم قاره‌ای کوهزایی (Syn – Cologen Granite)

۳) گرانیت‌های درون صفحه‌ای (Within Plate Granite)

۴) گرانیت‌های کمربندهای ماگمایی زون فرورانش (Volcanic Arc Granite)

ایزوتوپ‌ها و کاربرد آن‌ها در حل مسائل زمین‌شناسی:

- ایزوتوپ‌ها بر دو نوع‌اند:

  الف) پایدار

  ب) ناپایدار

- ایزوتوپ‌های ناپایدار برای سن سنجی مهم می‌باشند.
- ایزوتوپ‌های مهم ناپایدار:

نیمه‌عمر	واکنش
1.25×10	آرگون 40 → پتاسیم 40
4.88×10	استرانسیم 87 → روبیدیم 87
1.66×10	نوبیدیم 143 → ساماریم 147
7.04×10	سرب 237 → اورانیم ۲۳۵
4.48×10	سرب 206 → اورانیم 238

سن سنگ‌های آذرین را به دو روش تعیین می‌کنند:

الف) **نسبی**: با مقایسه سنگ‌ها با یکدیگر و با استفاده از پدیده‌های زمین‌شناسی مثلاً توده‌های نفوذی جوان‌ترند و یا یک گسل که جوان‌تر از لایه‌هایی است که آن‌ها را تحت تأثیر قرار داده و یا در لایه‌بندی لایه‌های بالایی جوان‌ترند.

ب) **مطلق**: که با استفاده از ایزوتوپ‌های ناپایدار است و بسیار دقیق‌تر است؛ مثلاً:

✔ روش پتاسیم ـ آرگون:

- این روش در سنگ‌هایی که دارای پتاسیم بوده و قابلیت نگه‌داری گاز آرگون را هم دارند استفاده می‌شود. پتاسیم مربوط به گروه اول جدول تناوبی است و از نظر فراوانی در پوسته هشتمین عنصر است و دارای ۳ ایزوتوپ 39 و40 و 41 است. در این میان پتاسیم 39 از همه بیشتر و پتاسیم 40 از همه کمتر است.

- آرگون به صورت گاز است و دارای ۳ ایزوتوپ 36 و 38 و 40 است که در این میان آرگون 40 از همه بیشتر و آرگون 38 از همه کمتر است.
- هر اندازه پتاسیم سنگ یا کانی بیشتر باشد از آن برای سن‌های جوان استفاده می‌شود. مثل کانی سانیدین و لوسیت و هرچه پتاسیم کمتر باشد برای سن‌های قدیمی استفاده می‌شود مثل کانی پیروکسن.

× کانی‌های مناسب برای تعیین سن به روش پتاسیم ـ آرگون:

- پتاسیم فلدسپار: این کانی به شکل ارتوز و میکروکلین برای تعیین سن به این روش مناسب نیستند زیرا در دمای معمولی نمی‌توانند آرگون را در خود نگه دارند؛ اما سانیدین برای این کار مناسب است که برای سن سنجی سنگ‌های جوان و آتش‌فشانی یا بیرونی استفاده می‌شود.
- پلاژیوکلاز: پلاژیوکلازهای حرارت بالا که در سنگ‌های آتش‌فشانی دیده می‌شوند مثل آلبیت دما بالا آرگون را به‌خوبی نگه می‌دارند و برای تعیین سن سنگ‌های قدیمی‌تر از پالئوسن استفاده می‌شود.
- نفلین: در سنگ‌های آذرین درونی و بیرونی برای تعیین سن سنگ‌های قدیمی استفاده می‌شود که K_2O حدود ۳ تا ۱۰ درصد است. اگر سنگ ما درجه دگرگونی آن کم باشد باز هم از نفلین می‌توان استفاده کرد.
- بیوتیت: برای سنگ‌های آذرین درونی، بیرونی و دگرگونی استفاده می‌شود.
- مقدار K_2O در حدود ۷ تا ۹ درصد است و برای تعیین سن‌های مختلف می‌توان از آن استفاده کرد.
- کوارتز: مناسب نیست و استفاده نمی‌شود.
- لوسیت: برای تعیین سن سنگ‌های آتش‌فشانی و جوان مناسب است چون K_2O حدود ۱۹ تا ۲۰ درصد است.
- مسکوویت: برای تعیین سن سنگ‌های آذرین درونی، دگرگونی و رگه‌های گرمابی استفاده می‌شود. مقدار K_2O در حدود ۸ تا ۱۲ درصد است. پس برای تعیین سن‌های مختلف می‌توان از آن استفاده کرد. چون مسکوویت بهتر از بیوتیت آرگون را در خود نگه می‌دارد بهتر است در سن سنجی از مسکوویت استفاده شود.
- فلوگوپیت و لپیدولیت: فلوگوپیت بیشتر در اسکارن‌های منیزیم دار دیده می‌شود و برای تعیین سن اسکارن‌ها استفاده می‌شود. لپیدولیت نیز به‌ندرت در پگماتیت‌ها دیده می‌شود.
- گلوکونیت: تن‌ها کانی است که به کمک آن می‌توان سن برخی سنگ‌های رسوبی را تعیین کرد. حاوی ۲ درصد K_2O است و برای سن‌های قدیمی (میلیون تا میلیارد سالی) از آن استفاده می‌شود.

- هورنبلند: برای سنگ‌های آذرین درونی و بیرونی و دگرگون که حاوی ۱ تا ۰/۲ درصد K_2O است و برای سن سنگ‌های اواسط دوران سوم و قدیمی‌تر استفاده می‌شود. از نظر نگهداری آرگون مقاوم‌ترین کانی به شمار می‌رود.
- پیروکسن: در سنگ‌های آذرین درونی، بیرونی و دگرگون دیده می‌شود. میزان K_2O آن کمتر از ۱ درصد است و برای سن‌های قدیمی‌تر از دوران دوم استفاده می‌شود.
- شیشه‌ها مثل ابسیدین: شیشه‌ها به‌شرط جوان بودن و عدم تغییرات شیمیایی و فیزیکی برای این کار مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- سیلویت (KCl): در سنگ‌های رسوبی تبخیری K_2O بسیار بالاست. به دلیل حلالیت بالا برای سن سنجی مناسب نیست.

✓ روش روبیدیم ـ استرانسیم:

- روبیدیم از گروه اول جدول تناوبی با شعاعی یونی مشابه پتاسیم، به‌جای پتاسیم در ساختار کانی‌های پتاسیم دار قرار می‌گیرد. مثل سانیدین، ارتوز، مسکوویت، بیوتیت، فلوگوپیت، هورنبلند و سیلویت
- روبیدیم دارای ۲ ایزوتوپ است: ^{85}Rb و ^{87}Rb که روبیدیم ۸۵ فراوان‌تر است. روبیدیم ۸۷ ناپایدار است و به‌تدریج تبدیل به استرانسیم ۸۷ می‌شود.
- استرانسیم از گروه دوم جانشین کلسیم از همین گروه می‌شود؛ مثلاً در کانی‌هایی مثل پلاژیوکلاز، کلسیت، آراگونیت، آپاتیت و...
- استرانسیم دارای ۴ ایزوتوپ است: ^{84}Sr و ^{86}Sr و ^{87}Sr و ^{88}Sr که در این میان ^{84}Sr از همه بیشتر و ^{88}Sr از همه کمتر است.
- استرانسیم اینشیال: به مقدار استرانسیم ۸۷ به استرانسیم ۸۶ که در موقع تشکیل سنگ وجود دارد استرانسیم اولیه یا اینشیال می‌گویند. به‌مرور از ^{84}Rb کاسته شده و به ^{87}Sr افزوده می‌شود.
- یکی از کاربردهای مهم روش روبیدیم استرانسیم تعیین منشأ ماگما است.
- در شهاب‌سنگ‌ها نسبت استرانسیم اینشیال پایین و در حدود 0.698 است.
- در جبه در ابتدای تشکیل نسبت استرانسیم اینشیال و در حال حاضر در حدود 0.703 تا 0.705 است.
- در بازالت‌های جزایر اقیانوسی بین 0.703 تا 0.706 است.
- در بازالت‌ها جزایر قوسی و بازالت‌های ریفت‌های درون قاره‌ای بین 0.703 تا 0.715 است. این نسبت در سنگ‌های آتش‌فشانی پایین و در شیل و کربنات با منشأ قاره‌ای بالاست.
- روبیدیم به دلیل خاصیت ژئوشیمیایی در پوسته قاره‌ای متمرکز می‌شود. در پوسته قاره‌ای که چندین بار دچار ذوب بخشی شده مقدار روبیدیم بیشتر است. بنابراین در سنگ‌های پوسته قاره‌ای نسبت اینشیال بالاتر از 0.70 است و در سنگ‌هایی که حاصل تفریق ماگمای اولترامافیک باشند این نسبت کمتر از 0.71 است.

✓ **ایزوتوپ‌های پایداری که در زمین‌شناسی مطالعه می‌شوند عبارت‌اند از:**

هیدروژن (H) و دوتریوم (D)

گوگرد ۳۲ (32S) و گوگرد ۳۴ (^{34}S)

اکسیژن ۱۶ (16O) و اکسیژن ۱۸ (^{18}O)

کربن ۱۲ (12C) و کربن ۱۴ (^{14}C)

- ایزوتوپ اکسیژن و هیدروژن:

✓ اکسیژن از فراوان‌ترین عناصر پوسته زمین است که دارای ۳ ایزوتوپ O^{16} و O^{17} و O^{18} است.

✓ O^{16} از همه بیشتر و O^{17} از همه کمتر است.

✓ هیدروژن دارای ۲ ایزوتوپ است: H^{1} و H^{2} (دوتریم D)

- میانگین استاندارد آب‌های اقیانوس:

اگر این میانگین مثبت باشد نشانگر افزایش ایزوتوپ‌های سنگین O^{18} و D است.

اگر این میانگین منفی باشد، نشانگر کاهش ایزوتوپ‌های سنگین O^{18} و D است.

برای تعیین منشأ ماگما و محلول‌ها و برای تعیین دمای محلول‌ها استفاده می‌شود.

ژنز و منشأ گرانیت‌ها یا ماگمای اسیدی در پوسته قاره‌ای:

- عوامل مؤثر در ذوب سنگ‌های پوسته قاره‌ای:

▪ ضخامت پوسته قاره‌ای به‌طور متوسط ۱۵ تا ۲۰ کیلومتر است. با در نظر گرفتن گرادیان حرارتی (35°c در هر کیلومتر) در عمق ۱۵ تا ۲۰ کیلومتری سنگ‌ها به دمای ۵۲۵ تا ۷۰۰ درجه می‌رسند ازآنجاکه دمای ذوب سنگ‌ها در حالت خشک با افزایش فشار بالا می‌رود پس در اعماق پوسته در حالت عادی ذوبی صورت نمی‌گیرد. افزایش گرادیان حرارتی یا آب آزاد شده از سیلیکات‌های آبدار می‌تواند باعث ذوب سنگ‌های پوسته قاره‌ای شود.

▪ گرادیان حرارتی پوسته‌های قاره‌ای در ریفت‌ها و نقاط داغ به دلیل واقع شدن در چرخه جریان‌های ماگمایی افزایش می‌یابد. بالا آمدن و عبور ماگمای مافیک و اولترامافیک باعث افزایش گرادیان حرارتی و ذوب بخشی می‌شود.

▪ دمای ذوب سنگ‌ها در حضور آب کاهش می‌یابد این آب در اعماق زیاد از سیلیکات‌های آبدار آزاد می‌شود. مثل بیوتیت، مسکوویت، آمفیبول، هورنبلند و فلوگوپیت.

▪ درصد ذوب بخشی و ترکیب و حجم ماگما در پوسته قاره‌ای بستگی دارد به: ترکیب شیمیایی سنگ مادر، نوع سیلیکات آبدار، حجم آب آزاد شده و فشار و دما در منطقه ذوب.

- با گرادیان حرارتی 30°C در هر کیلومتر مسکوویت در دمای 700°C می‌شکند. بیوتیت در دمای 780°C و فلوگوپیت در دمای 890°C و هورنبلند در دمای 940°C می‌شکند.

- ویژگی‌های ماگمایی که مسکوویت در ذوب آن نقش دارد:
  ۱) دما پایین است
  ۲) عمق تشکیل کم است
  ۳) میزان پتاسیم زیاد است
  ۴) نسبت K/Na بیشتر از یک است
  ۵) ترکیب ماگما در محدوده اسیدی است
  ۶) تشکیل باتولیت می‌دهد (گرانیتی که در عمق سرد می‌شود)
  ۷) در سنگ حاصله گارنت، مسکوویت، کروندم، آندالوزیت و سیلیمانیت دیده می‌شود.
  ۸) غنی از آلومینیم است.
  ۹) استرانسیم اینشیال بیشتر از 0.71 است
  ۱۰) فاصل‌های که ماگما از منشأ تا نقطه نهایی تبلور طی می‌کند کم است.

- ویژگی ماگمایی که بیوتیت در ذوب آن نقش دارد: (نسبت به گروه قبلی)
  ۱) دما بالاتر است
  ۲) نسبت K/Na کمتر از یک
  ۳) میزان آلومینیم کمتر است ولی نسبت Fe/Mg بیشتر است
  ۴) محدوده ترکیب شامل گرانیت، گرانودیوریت و تونالیت است.
  ۵) تشکیل سنگ‌های درونی می‌دهد و در سنگ‌های این ماگما گارنت و آلانیت دیده می‌شود.

- ویژگی‌های ماگمایی که هورنبلند در ذوب آن نقش دارد: (نسبت به گروه قبلی)
  ۱) عمق تشکیل بیشتر
  ۲) دمای اولیه بیشتر
  ۳) ترکیب ماگما شامل دیوریت، تونالیت و گرانودیوریت است.
  ۴) نسبت K/Na کمتر از یک
  ۵) میزان آلومینیم کمتر از قبلی
  ۶) تشکیل سنگ‌های آتش‌فشانی و نیمه عمیق می‌دهد.
  ۷) استرانسیم اینشیال کمتر از 0.71 است.
  ۸) کانی‌های مگنتیت، هورنبلند و اسفن در این سنگ‌ها دیده می‌شود.

- تغییرات ایجاد شده توسط آلومینیم در ماگمای اسیدی:

۱) افزایش آلومینیم دمای ذوب و شروع تبلور را کاهش می‌دهد.

۲) در سیستم سه‌تایی آلبیت ـ ارتوز ـ اکسید سیلیس، افزایش Al_2O_3 در حالتی که آب در سیستم وجود دارد (فشار مرطوب) دمای نقطه مینیمم را کاهش می‌دهد و ترکیب آن به سمت SiO2 تغییر می‌کند؛ مثلاً در شرایط اشباع از آب و فشار 2Kb دمای مینیمم گرانیت ساب آلومینیم 685°C و گرانیت فوق آلومینیم 660°C است. در حالت غیر اشباع از آب و در فشار 2Kb دمای مینیمم برای گرانیت ساب آلومینیم 775°C و برای فوق آلومینیم 755°C است.

۳) حلالیت آب در ماگما رابطه مستقیم با میزان آلومینیم دارد. (گرانیت فوق آلومینیم آب بیشتری حل می‌کند)

۴) حلالیت عناصر با ظرفیت بالا مثل Fe^{3+} و Ti^{4+} و Sr^{4+} و...در ماگمای پرآلکالن نسبتاً زیاد و در ماگمای آلومینیم دار کم است.

۵) میزان FeO با افزایش آلومینیم تغییر نمی‌کند.

۶) نسبت FeO/MgO در گرانیت فوق آلومینیم کمتر از ساب آلومینیم است.

- نقش اکسید فسفر در ماگمای اسیدی یا حد واسط (P_2O_5):

۱) P2O5 در گرانیت فوق آلومینیم بیشتر از ساب آلومینیم است.

۲) تغییرات P2O5 در گرانیت فوق آلومینیم توسط کلسیم کنترل می‌شود. در صورت غنی بودن ماگما از کلسیم میزان P_2O_5 با افزایش SiO_2 کاهش می‌یابد. (چون تشکیل کانی آپاتیت می‌دهد) درصورتی‌که کلسیم کم باشد میزان P_2O_5 با افزایش SiO_2 افزایش می‌یابد و درنهایت وارد شبکه فلدسپات‌ها می‌شود.

۳) میزان P_2O_5 ماگمای اسیدی با افزایش ضریب شاند افزایش می‌یابد.

- نقش فلوئور (F) در ماگمای اسیدی و حد واسط:

۱) دما و ترکیب نقطه مینیمم در سیستم آلبیت ارتوز ـ اکسید ـ سیلیس، با افزایش فلوئور کاهش می‌یابد؛ مثلاً در فشار یک کیلو بار بخار آب بدون فلوئور دمای نقطه مینیمم 730°C و ترکیب آن شامل ۳۸ درصد کوارتز و ۳۳ درصد آلبیت و ۳۹ درصد ارتوز است.

اگر فلوئور ۴ درصد باشد دمای نقطه مینیمم 630°C می‌شود و ترکیب شامل ۱۵ درصد کوارتز و ۵۸ درصد آلبیت و ۲۷ درصد ارتوز می‌شود.

۲) مقدار آبی که در ماگما حل می‌شود با افزایش فلوئور افزایش می‌یابد.

۳) افزایش فلوئور غلظت ماگما را افزایش می‌دهد.

- نقش بور (B) در ماگمای اسیدی و حد واسط:

۱) باعث کاهش غلظت ماگما می‌شود.

۲) دمای ذوب و تبلور را کاهش می‌دهد.

۳) ترکیب نقطه مینیمم به سمت غنی شدن از آلبیت حرکت می‌کند.

۴) میزان حلالیت آب را افزایش می‌دهد. بور در سنگ‌های گرانیتی به صورت تورمالین دیده می‌شود خصوصاً در لوکوگرانیت‌های غنی از آلومینیم

- نقش آهن در ماگمای گرانیتی:

۱) میزان آهن گرانیت ساب آلومینیم و فوق آلومینیم با افزایش دما افزایش می‌یابد. میزان آب هیچ تأثیری در مقدار آهن ندارد.

۲) فوگاسیته O (فشار گاز اکسیژن) نسبت Fe^{2+}/Fe^{3+} را کنترل می‌کند. در حالت احیایی Fe^{2+} وارد کانی‌ها می‌شود (به صورت اکسید آهن و تیتان مثل ایلمنیت) و در حالت اکسیدان Fe^{3+} وارد کانی‌ها می‌شود (به صورت مگنتیت)

۳) در گرانیت فوق آلومینیم نسبت آهن به منیزیم در مقایسه با گرانیت ساب آلومینیم کمتر است.

- **نکته**:

ـ غلظت ماگما با میزان آب موجود در آن رابطه عکس دارد.

ـ افزایش بور و فلوئور باعث کاهش غلظت ماگما می‌شود.

ـ افزایش آلومینیم باعث کاهش غلظت ماگما می‌شود.

ـ درصد بلورها با غلظت رابطه مستقیم دارد.

ـ غلظت ماگما با حباب‌های گاز رابطه مستقیم دارد.

ـ گاز محلول با غلظت رابطه عکس دارد.

منشأ ماگمای تولئیتی در زون فروانش:

- بازالت‌های تولئیتی در زون فرورانش نسبتاً فراوان‌اند. اولین سری در کمربندهای آتش‌فشانی، آذرین درونی می‌باشند. در نزدیکی زون فرورانش تشکیل می‌شوند اما نسبت به ماگمای کالکوآلکالن و آلکالن در عمق کمتری تشکیل می‌شوند.
- مطالعاتی که در خصوص منشأ انجام شده:
- ابتدا پریدوتیت را در فشار معادل ۸۰ تا ۱۰۰ کیلومتری و گرادیان حرارتی معادل آن قراردادند، هیچ ذوبی صورت نگرفت. سپس بازالت را در دما و فشار گفته شده قرار دادند. این بار هم هیچ ذوبی صورت نگرفت ولی بازالت به اکلوژیت دگرگون شد. با اضافه کردن آب سنگ پریدوتیتی ذوب شد اما اکلوژیت ذوب نشد پس ماگمای تولئیتی حاصل ذوب پریدوتیت در مجاورت آب در فشار ۸۰ تا ۱۰۰ کیلومتری و دمای 650°C است.
- پوسته اقیانوسی که بخش فوقانی آن بازالت است تحت تأثیر دگرگونی به آمفیبولیت تبدیل می‌شود. آمفیبولیت در عمق ۸۰ تا ۱۰۰ کیلومتری به اکلوژیت تبدیل می‌شود. آب آزاد شده از هورنبلند دمای ذوب پریدوتیت‌های واقع در

بخش فوقانی پوسته اقیانوسی را کاهش می‌دهد و از ذوب آن‌ها ماگمای تولئیتی تولید می‌شود. پس نقش زون فرورانش در این عمق آزاد نمودن آب و کاهش دمای ذوب سنگ‌های جبه است. در مناطقی که زاویه زون فرورانش کم است پوسته اقیانوسی نمی‌تواند به عمقی برسد که هورنبلند شکسته شود و آب آزاد شده از آن بتواند سنگ‌های منطقه را ذوب کند پس ماگماتیسم دیده نمی‌شود.

منشأ ماگمای کالک‌آلکالن در زون فرورانش:

- سنگ‌های کالک‌آلکالن تا به امروز فقط در زون فرورانش شناخته‌شده‌اند. بر اساس مطالعات رینگ‌وود پوسته اقیانوسی از بالا به پایین شامل سه بخش اصلی است:
  ۱) بخش رسوبی
  ۲) بخش بازالتی
  ۳) سنگ‌های اولترامافیک
- بخش بازالتی به دلیل دگرگونی، سرپانتینیزه می‌شود. بازالت را تحت فشار و حرارت قرار داده‌اند. پلاژیوکلاز ابتدا تبدیل به اسپیدن و سپس تبدیل به گارنت شد پس بازالت در فشار بالا به اکلوژیت تبدیل می‌شود. در عمق ۸۰ تا ۱۰۰ کیلومتری آب آزاد شده از هورنبلند نقطه ذوب سنگ‌های واقع در بالای پوسته اقیانوسی را کاهش داده و ماگمای تولئیتی ایجاد می‌کند.
- قسمتی از این آب به صورت سیلیکات‌های آبدار فشرده به اعماق بیشتر حمل می‌شود و در عمق ۱۵۰ کیلومتری آب خود را از دست داده و نقطه ذوب اکلوژیت پایین می‌آید. از ذوب اکلوژیت ماگمای ریوداسیتی و ریولیتی تولید می‌شود که ترکیب کالک‌آلکالن ندارند. بنابراین اگر در مجاورت سنگ‌های گوشته قرار گیرند سنگی به نام گارنت پیروکسنیت تولید می‌کند که وزن مخصوص کم داشته و به صورت دیاپیر بالا می‌آید و شروع به ذوب می‌کند. ماگمای تولید شده ترکیب کالک‌آلکالن خواهد داشت.

منشأ ماگمای آلکالن در زون فرورانش:

- در اعماق بیش از ۱۵۰ کیلومتر در زون فرورانش آب آزاد شده از سیلیکات‌های آبدار فشرده، دمای ذوب باقی‌مانده اکلوژیت را کاهش می‌دهد و ماگمای آلکالن تولید می‌کند.

منشأ ماگما در زون گسترش میان‌اقیانوسی:

- بازالت‌های زون گسترش میان‌اقیانوسی را با علامت MORB نشان می‌دهند.
- (mide oceanic ridg basalt) این بازالت‌ها عمدتاً مربوط به سری تولئیتی و به مقدار کم در سری آلکالن می‌باشند. بازالت‌های زون گسترش از نظر عناصر اصلی تفاوت زیادی با بازالت‌های جزایر قوسی و جزایر اقیانوسی و ریفت‌های درون قاره‌ای ندارند؛ اما میزان پتاسیم ـ روبیدیم ـ باریم ـ استرانسیم ـ فسفر و تیتانیوم در آن‌ها بیشتر است.

- برای سنجش میزان تفریق از نسبت $M = Mg / Mg + Fe) \times 100$) استفاده می‌شود. اگر M حدود ۷۰ باشد ماگما منشأ گوشته دارد، اولیه است و دچار تفریق نشده است. در MORB این مقدار در حدود ۵۵ تا ۶۵ است پس ماگمای اولیه تحت تأثیر تفریق قرار گرفته. بر اساس عناصر فرعی و کمیاب بازالت‌های میاناقیانوسی به دو نوع تقسیم‌بندی می‌شوند.

  N: نرمال (تهی شده) ← از اقیانوس آرام

  P: غنی‌شده ← از زون گسترش گالاپاگوس
- در نوع دوم عناصر پتاسیم و روبیدیم و باریم از نوع اول بیشتر است. همچنینی در بازالت‌های نوع نرمال عناصر کمیاب سبک در مقایسه با عناصر کمیاب سنگین کاهش نشان می‌دهد. در حالی که در نوع P عناصر کمیاب سبک در مقایسه با عناصر کمیاب سنگین غنی‌شدگی نشان می‌دهد. این مسئله نشانگر آن است که بازالت N از جبه فوقانی که دارای تهی شدگی است منشأ گرفته است ولی بازالت نوع P از عمق بیشتر و سنگ منشأ غنی‌تر تشکیل شده است.
- بر اساس عناصر کمیاب و فرعی، ایزوتوپ‌ها و اطلاعات ژئوفیزیکی، بازالت‌های میاناقیانوسی نتیجه ذوب دیاپیرهایی هستند که منشأ آن‌ها از استنوسفر است این دیاپیرها در محدوده عمق اسپینل ـ پلاژیوکلاز ـ پریدوتیت (عمق ۶۰ تا ۷۰ کیلومتری) شروع به ذوب می‌کنند. عوامل مهم ذوب عبارت‌اند از:

  ۱) کاهش دمای ذوب دیاپیرها در اثر کاهش فشار حین بالا آمدن توده

  ۲) بالا بودن گرادیان حرارتی در زون گسترش میاناقیانوسی

بازالت‌های جزایر اقیانوسی:

- بازالت‌های نقاط داغ درون صفحه‌های اقیانوسی را با علامت OIM نشان می‌دهند.
- هر دو نوع بازالت تولئیتی و آلکالن در آن‌ها دیده می‌شود. مقدار عناصر پتاسیم، روبیدیم، باریم، زیرکونیم و نئوبیوم در این بازالت‌ها از نوع MORB بیشتر است. ماگمای جزایر اقیانوسی نتیجه ذوب و اختلاط چند ماگما است.
- موادی که در تشکیل این ماگما مشارکت دارند عبارت‌اند از:

  الف) استنوسفر تحتانی دارای غنی‌شدگی

  ب) استنوسفر فوقانی دارای تهی شدگی

  ج) لیتوسفر با تهی شدگی

  د) بقایای پوسته اقیانوسی

- ماگمای تولئیتی حاصل درصد ذوب بالا حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد در عمق کم است
- ماگمای آلکالن حاصل درصد ذوب کم حدود ۵ تا ۱۵ درصد در عمق بیشتر است
- علت اصلی ذوب حرکت دیاپیرها به سمت بالا و کاهش فشار است. عمق منشأ دیاپیرها حدود ۷۰۰ کیلومتر و در حد فاصل جبه تحتانی و جبه فوقانی است.
- نقش گاز CO_2 در ترکیب بازالت: پریدوتیت را در فشار ۱۰ تا ۱۵ کیلوبار با نسبت‌های مختلف CO_2 ذوب کردیم. نتایج زیر به دست آمد:

اگر نسبت H_2O / CO_2 بالا باشد ← ماگما آندزیتی می‌شود.
اگر نسبت H_2O / CO_2 متوسط باشد ← ماگما الیوین ـ تولئیت می‌شود.
اگر نسبت H_2O / CO_2 کم باشد ← ماگما الیوین نفلینیت یا ملی لیت می‌شود.

- نتیجه‌گیری: ماگمای تحت اشباع از سیلیس در شرایط زیر ایجاد می‌شود:
  - ۱) درصد ذوب کم پریدوتیت
  - ۲) فشار یا عمق زیاد
  - ۳) نسبت H_2O / CO_2 کم

- ماگمای اشباع از سیلیس در شرایط زیر ایجاد می‌شود:

۱) درصد ذوب زیاد
۲) فشار یا عمق کم
۳) نسبت H_2O / CO_2 زیاد

کیمبرلیت ها:

- سنگ‌های آذرین اولترامافیک و غنی از پتاسیم. K_2O بیشتر از ۳ درصد و MgO هم بیشتر از ۳ درصد. نسبت K_2O / Na_2O بیشتر از ۲ است.

لامپروئیت ها:

۱) به صورت دایک دیاترم و گدازه دیده می‌شوند و حاوی الماس هستند.

- خصوصیات ژئوشیمیایی:
- Na_2O کمتر از ۲ درصد ـ Al_2O_3 کمتر از ۱۲ درصد ـ CaO کمتر از ۸ درصد
- از نظر کانی‌شناسی دارای فلوگوپیت غنی از تیتانیوم ـ دیوپسید با آلومینیوم کم ـ لوسیت و آمفیبول با آلومینیوم کم ـ الیوین، سانیدین غنی از آهن و فاقد پلاژیوکلاز ـ نفلین و ملی لیت

۲) کامافوسیت ها: به صورت دایک و گدازه دیده می‌شوند.

- خصوصیات ژئوشیمیایی:
- Al_2O_3 کمتر از ۱۲ درصد، CaO بیش از ۱۰ درصد، SiO_2 کمتر از ۴۰ درصد Na_2O کمتر از ۱/۳۸ درصد
- از نظر کانی‌شناسی دارای الیوین، فلوگوپیت، کلینوپیروکسن، لوسیت، ملی لیت، پرووسکیت و کالسیلیت (ایزومورف نفلین) است.
- تفاوت با لامپروئیت‌ها در داشتن ملی لیت و کالسیلیت و نداشتن سانیدین است.

- منشأ کیمبرلیت ها: ماگمای کیمبرلیتی دارای چند ویژگی است:
  1) اولترامافیک غنی از پتاسیم
  2) غنی از گازهای CO_2 و H_2O
  3) Na_2O نسبتاً کم است
  4) K_2O / Na_2O زیاد است.
  5) غنی از عناصر ناسازگار
  6) حاوی سینولیت‌ها و سینوکریست‌ها ی مختلف از جبه و پوسته قارهای

- در فشار بیش از ۲۰ کیلو بار CO_2 به صورت کانی دولومیت تشکیل می‌شود. در فشار بیش از ۲۷ کیلوبار دولومیت به منیزیت تبدیل می‌شود. در فشار ۲۲/۵ کیلوبار آمفیبول شکسته می‌شود و کانی فلوگوپیت در حضور آب تشکیل می‌شود. پریدوتیت حاوی دولومیت یا منیزیت در اعماق زیاد با درصد ذوب کم ماگمای کیمبرلیتی تولید می‌کند. کیمبرلیت‌های حاوی الماس باید در عمق بیشتر از ۱۳۵ کیلومتری تشکیل شده باشند.
- در شرایط ذوب کم ماگمای کربوناتیتی و با افزایش درصد ذوب ماگمای کیمبرلیتی تشکیل می‌شود. عمق تشکیل کیمبرلیت‌ها در محدوده گارنت لرزولیت است.

- نتیجه‌گیری:
  - بازالت تولئیتی در عمق کمتر از ۱۵ کیلوبار فشار؛
  - بازالت آلکالن در عمق ۱۵ تا ۲۵ کیلوبار فشار؛
  - ماگمای کربوناتیتی در عمق ۳۰ تا ۳۵ کیلو بار فشار؛
  - ماگمای کیمبرلیتی در عمق بیشتر از ۴۰ کیلو بار تشکیل می‌شود.

فهرست منابع:

۱- پترولوژی تجربی، دکتر علی درویش زاده - دانشگاه تهران؛
۲- پترولوژی سنگ‌های آذرین، دکتر کریم پور - دانشگاه فردوسی مشهد؛
۳- پترولوژی، دکتر علی درویش زاده - دانشگاه پیام نور؛
۴- پترولوژی سنگ‌های دگرگونی، دکتر معین وزیری - دانشگاه تربیت معلم.